

Verfahren zur Erkennung von verbindbaren Flächen

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum automatischen Erkennen von verbindbaren Flächen in einem technischen System. Das System umfaßt Körper, die durch Anwendung einer Fügetechnologie paarweise miteinander verbindbar sind. Vorgegeben ist eine rechnerverfügbare Konstruktion des Systems, die für jeden Körper des Systems mindestens eine zum Körper gehörende Fläche umfaßt.

Eine wichtige Fügetechnologie ist das Herstellen von Klebeverbindungen. Diese werden z. B. im Automobilbau zunehmend angewendet, weil eine Schweißverbindung technisch nicht herstellbar ist, die zu verbindenden Flächen für Schweißer oder Schweißautomaten schwer zugänglich sind oder weil die Schweißverbindung den auftretenden Belastungen und Kräften nicht standhalten kann. Eine Schweißverbindung ist insbesondere dann oft nicht möglich oder unwirtschaftlich, wenn die beiden Körper aus unterschiedlichen Werkstoffen gefertigt werden, z. B. aus Aluminium und Stahl oder Aluminium und Magnesium, oder wenn mindestens eine der Begrenzungsflächen der Körper aus Kunststoff besteht.

Der Begriff „Fügeverbindung“ umfaßt im folgenden auch Dichtungen zwischen zwei Körpern, die z. B. die Aufgabe haben, einen Mindestabstand zwischen zwei Körpern zu gewährleisten

und dabei bestimmte elastische Eigenschaften aufzuweisen oder eine Geräuschkämpfung oder Isolierung zu bewirken.

Vorzugsweise werden die verbindbaren Flächen und die Schichten zwischen den verbindbaren Flächen in Finite Elemente zerlegt. Anschließend werden Finite-Elemente-Simulationen durchgeführt. Durch Auswertung der Simulationsergebnisse wird das mechanische Verhalten des Systems vorhergesagt.

Die Methode der Finiten Elemente ist aus „Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau“, 20. Auflage, Springer-Verlag, 2001, C 48 bis C 50, sowie aus T. R. Chandrupalta & A. D. Belegundu: „Introduction to Finite Element in Engineering“, Prentice-Hall, 1991, bekannt. Durch Simulation mit Hilfe Finiten Elemente werden Festigkeitsaufgaben aller Art, z. B. zur Spannungsverteilung oder Stabilität, numerisch gelöst. Beispielsweise wird ermittelt, wie sich ein System aus mehreren festen Körpern unter äußeren Belastungen verformt und verbiegt und wie sich die Körper relativ zueinander verschieben. Gegeben ist eine rechnerverfügbare Konstruktion eines zu untersuchenden Systems. In der Konstruktion wird eine bestimmte Menge von Punkten festgelegt, die Knotenpunkte („nodes“) heißen. Als Finite Elemente werden die Flächen- oder Volumenelemente bezeichnet, die mit Hilfe der Knotenpunkte als deren Ecken gebildet werden. Gekrümmte Flächen oder Körper, die näherungsweise als Flächen behandelt werden, z. B. Bleche einer Karosserie eines Kraftfahrzeugs, werden hierbei oft in Schalenelemente („shell elements“) zerlegt. Die Knotenpunkte bilden ein Netz in der Konstruktion, weswegen der Vorgang, Knotenpunkte festzulegen und Finite Elemente zu erzeugen, Vernetzung („meshing“) der Konstruktion genannt wird. Je nach Aufgabenstellung werden die Verschiebungen dieser Knotenpunkte und/oder Rotationen der Finiten Elemente in diesen Knotenpunkten oder die Spannungen in diesen Finiten Elementen als Unbekannte eingeführt. Gleichungen werden aufgestellt, welche die Verschiebungen, Rotationen oder Spannungen innerhalb eines Finiten Elements näherungsweise beschreiben. Weitere Gleichungen resultieren aus Abhängigkeiten zwischen

verschiedenen Finiten Elementen, z. B. daraus, daß das Prinzip der virtuellen Arbeit in den Knotenpunkten erfüllt sein muß und die berechneten Verschiebungen stetig sein müssen und die Randbedingung erfüllen müssen, daß in der Realität Klaffungen oder Durchdringungen nicht auftreten.

In vielen Fällen sind derartige Gleichungen linear in den Unbekannten. Die Methode der Finiten Elemente läßt sich aber ebenfalls im Falle nichtlinearer Gleichungen anwenden, z. B. für Gleichungen in Form von Polynomen. Insgesamt wird ein oft sehr umfangreiches Gleichungssystem mit den Knotenpunkt-Verschiebungen, Knotenpunkt-Rotationen, Element-Spannungen oder andere Größen als Unbekannte aufgestellt und numerisch gelöst. Die Lösung beschreibt beispielsweise den Verformungszustand des Systems unter vorgegebenen Belastungen. Aus dieser mechanischen Lösung lassen sich z. B. Spannungsverteilungen, Schwingungsverhalten, Beulverhalten oder Vorhersage der Lebensdauer ableiten. Sind z. B. die Verschiebungen und Rotationen aller Knotenpunkte eines Finiten Elements bestimmt, so läßt sich die Spannung im Element herleiten.

Verschiedene Körper eines Systems werden oft unabhängig voneinander vernetzt. Beispielsweise ist das System Teil der Karosserie eines zu konstruierenden Kraftfahrzeuges, und die Körper sind Teilsysteme, die von verschiedenen Lieferanten zeitlich parallel konstruiert werden, ohne daß die Vernetzungen aneinander angepaßt werden. Weil die Körper unabhängig voneinander vernetzt sind, liegen die Knotenpunkte auf aneinander angrenzenden Oberflächen der Körper oft nicht aufeinander, sondern sind z. B. gegeneinander verschoben oder gehören zu Finiten Elementen unterschiedlicher Größen und unterschiedlicher Orientierungen im Raum. Derartige Vernetzungen von aneinander angrenzenden Körpern werden als inkompatible Vernetzungen bezeichnet.

Eine realitätsnahe Finite-Elemente-Simulation muß die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den Körpern, die aufgrund der aneinander angrenzenden Oberflächen hervorgerufen werden, berücksichtigen. Gewünscht werden Finite-

Elemente-Simulationen, die diese Wechselwirkungen und Abhängigkeiten auch bei unabhängigen und daher in der Regel inkompatiblen Vernetzungen der Körper berücksichtigen. Denn wenn eine kompatible Vernetzung für die Aufstellung des Gleichungssystems und Durchführung der Simulationen notwendig sein würde, können die Körper nicht unabhängig voneinander vernetzt werden.

Ein Verfahren zur Finite-Elemente-Simulation einer Klebeverbindung ist aus G. Tokar: „Punktschweißkleber - Eigenschaften und Berechnungsmethode für lineare Karosseriesteifigkeiten“, VDI-Berichte Nr. 1559, S. 549 - 575, 2000, bekannt. Finite-Elemente-Simulationen werden für ein System durchgeführt, das zwei Bleche umfaßt, die durch eine Klebnaht verbunden sind. Aufgrund äußerer Belastungen treten Verschiebungen zwischen und innerhalb der Bleche auf, die durch die Simulationen vorhergesagt werden. Für die Simulationen werden Finite Elemente in den Blechen und in der verbindenden Klebeschicht erzeugt.

Das in G. Tokar, a.a.O., offenbarte Verfahren erfordert viel manuelle Arbeit für den Fall, daß das zu untersuchende System viele Körper mit verbindbaren Flächen oder Flächen mit komplizierter Geometrie umfaßt. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn der Körper ein zu konstruierendes Kraftfahrzeug ist. Ein Bearbeiter muß manuell in einer Konstruktion des Systems die Klebenähte markieren.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren bereitzustellen, das bei einer vorgegebenen Fügetechnologie, durch deren Anwendung eine Schicht zwischen jeweils zwei Körpern des Systems erzeugbar ist, die Vernetzung für Finite-Elemente-Simulationen eines Systems mit mehreren Körpern erleichtert und beschleunigt.

Die Aufgabe wird durch ein Verfahren nach Anspruch 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen angegeben.

Gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren nach Anspruch 1 umfaßt die rechnerverfügbare Konstruktion des Systems mehrere Flä-

chen. Jede dieser Flächen gehört zu einem Körper des Systems. Beispielsweise sind die Flächen Oberflächen der Körper oder Flächen, welche die jeweiligen Körper approximieren. Im Falle von dünnen Blechen als Körper sind die approximierenden Flächen bevorzugt deren Mittelflächen. Die Konstruktion umfaßt nicht notwendigerweise volumenhafte Modelle der Körper.

Vorgegeben ist eine Fügetechnologie, beispielsweise ein bestimmtes Klebverfahren. Die Fügetechnologie erzeugt eine Schicht zwischen jeweils zwei Körpern, beispielsweise eine Klebnaht oder eine Dichtung. Finite Elemente für die Flächen werden erzeugt. Erfindungsgemäß werden automatisch diejenigen Flächen oder Teilbereiche von Flächen des Systems erkannt, die sich durch die vorgegebene Fügetechnologie verbinden lassen. Hierfür werden diejenigen Zwischenräume zwischen jeweils zwei Flächen der Konstruktion automatisch erkannt, die sich mit einer von der Fügetechnologie erzeugten Schicht füllen lassen. Beispielsweise werden diejenigen Zwischenräume zwischen je zwei Flächen erkannt, die sich bei Anwendung des Klebverfahrens durch eine Klebnaht füllen lassen.

Bei der Erkennung der Zwischenräume werden alle Flächen-Paare ermittelt, das aus zwei verschiedenen Flächen der Konstruktion besteht. Anschließend werden verbindbare Paare von Finiten Elementen in diesen Flächen-Paaren automatisch ermittelt. Für jedes Flächen-Paar, das aus zwei Flächen verschiedener Körper besteht, werden die im folgenden beschriebenen Verfahrensschritte durchgeführt. Die Flächen eines solchen Flächen-Paars sind Kandidaten dafür, mit einer vorgegebenen Fügetechnologie vollständig oder in Teilbereichen verbunden zu werden. Alle Element-Paare eines Flächen-Paars mit folgenden Eigenschaften werden ausgewählt:

- Das Element-Paar besteht aus jeweils einem Finiten Element der einen und einem Finiten Element der anderen Fläche des Flächen-Paars.

- Die beiden Finiten Elemente des Element-Paars haben einen Abstand voneinander, der kleiner oder gleich einer vorgegebenen oberen Schranke ist.

Ein Element-Paar, das aus zwei Finite Elementen derselben Fläche besteht, wird nicht ausgewählt. Ein Element-Paar, das aus zwei Finite Elementen besteht, deren Abstand voneinander größer als die vorgegebene Schranke ist, wird ebenfalls nicht ausgewählt. Falls beispielsweise das System drei Körper und die Konstruktion vier Flächen umfaßt und falls jede dieser Flächen in 100 Finite Elemente zerlegt ist, so gibt es $4 * 3 / 2 = 6$ Flächen-Paare und pro Flächen-Paar 100*100 Elemente-Paare. Falls jedes Finite Element der einen Fläche zu vier Finiten Elementen der anderen Fläche einen Abstand kleiner oder gleich der oberen Schranke hat, so werden pro Flächen-Paar 100*4 Elemente-Paare ausgewählt.

Diese Auswahl wird so durchgeführt, daß alle Paare von verbindbaren Finiten Elementen sich unter den ausgewählten Paaren befinden, also alle nicht ausgewählten Paare nicht verbindbar sind. Für die Auswahl wird eine rechnerverfügbare und schnell durchführbare Auswahlvorschrift angewendet. Die ausgewählten Paare Finiten Elemente werden eingehender untersucht. Dadurch wird für jedes ausgewählte Element-Paar entschieden, ob die beiden Finiten Elemente des Elemente-Paars durch die Fügetechnologie verbindbar sind oder nicht. Zum automatischen Fällen der Entscheidung wird ein rechnerauswertbares Entscheidungs-Kriterium angewendet, das die Positionen und/oder Orientierungen der beiden Finiten Elemente mit vorgegebenen oberen und/oder unteren Schranken vergleicht. Diese Schranken werden vorzugsweise in Abhängigkeit von technischen Eigenschaften der Fügetechnologie vorgegeben. Beispielsweise darf eine Klebenahrt bei dem Klebverfahren höchstens 1 mm dick sein und muß mindestens 0,2 mm dick sein.

Die ausgewählten und als verbindbar erkannten Elemente-Paare begrenzen Zwischenräume zwischen Flächen oder Teilbereiche von Flächen der Konstruktion. Weitere Finite Elemente für diese Zwischenräume werden erzeugt. Mit Hilfe der Knotenpunk-

te dieser weiteren Finiten Elemente lassen sich Gleichungen für das mechanische Verhalten der Schichten in den Zwischenräumen sowie für mechanische Abhängigkeiten zwischen den Schichten und den angrenzenden Flächen aufstellen.

Die Erfindung berücksichtigt ohne zusätzliche Verfahrensschritte die Möglichkeit, daß nur Teile zweier Flächen miteinander durch die Fügetechnologie verbindbar sind, andere Teile hingegen nicht. Beispielsweise ist ein Körper ein ebenes Blech und ein anderer Körper ein V-förmig gefaltetes Blech. Ein Bereich des ebenen Blechs läßt sich mit dem einem Schenkel des gefalteten Blechs verbinden, aber nicht mit dem anderen. Beide Bleche werden durch ihre Mittelebenen approximiert. Gemäß des erfindungsgemäßen Verfahrens werden verbindbare Finite Elemente von Flächen ermittelt. Dabei werden ausschließlich Finite Elemente in dem einen verbindbaren Schenkel des V-förmigen Blechs ermittelt.

Weil auf Finite Elemente von Flächen die Prüfungen auf Verbindbarkeit angewendet werden, sind weniger Vergleichsoperationen durchzuführen, als wenn die Prüfungen auf Finite Elemente in Körpern angewendet werden würden. Finite Elemente in Flächen sind nämlich in der Regel durch weniger Parameter beschrieben. Der Vorteil, mit weniger Vergleichsoperationen auszukommen, fällt vor allem dann ins Gewicht, wenn für die Flächen Tausende oder gar Hunderttausende von Finiten Elementen erzeugt werden, was beispielsweise bei Konstruktionen mit vielen Flächen oder bei einer feinen Zerlegung der Flächen in viele kleine Finite Elemente der Fall sein kann.

Für die Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist eine rechnerverfügbare Konstruktion des Systems mit Flächen für die Körper vorgeben. Nicht erforderlich ist, daß die Konstruktion volumenhafte Modelle der Körper umfaßt. Daher läßt das Verfahren sich bereits früh im Produktentstehungsprozeß anwenden, nämlich zu einem Zeitpunkt, an dem nur die Begrenzungsflächen oder approximierenden Flächen der Körper festgelegt sind, aber noch keine Details der Körper. Die Verwendung von Flächen und von Finiten Elementen in Form von Flächenele-

menten spart außerdem erheblich Rechenzeit sowie Rechen- und Speicherkapazität in Vergleich zur Verwendung von volumenhaften Modellen und Volumenelementen als Finite Elemente ein.

Weil die Paare verbindbarer Finiter Elemente und damit verbindbarer Flächen automatisch ermittelt werden, können diejenigen Fehler nicht auftreten, die ein Bearbeiter, beispielsweise ein Berechnungs-Ingenieur, bei der manuellen Festlegung verbindbarer Flächen begehen kann. Gerade bei einem umfangreichen System, z. B. einem Kraftfahrzeug, kommen viele Paare von Flächen dafür in Betracht, durch die vorgegebene Füge-technologie verbunden zu werden. Die manuelle Vorgabe der tatsächlich verbindbaren Paare ist eine zeitaufwendige und fehlerträchtige Routinearbeit und manchmal überhaupt nicht in vertretbarer Zeit auszuführen.

Das Entscheidungskriterium, das gemäß Anspruch 1 zur Ermittlung verbindbarer Elemente-Paare angewendet wird, ist ein rechnerverfügbares, automatisch auswertbares Kriterium. Es liefert die verbindbaren Flächen oder Bereiche von Flächen wesentlich schneller als Bearbeiter durch manuelle Vorgabe. Daher ist die Ermittlung verbindbarer Flächen objektiv, nachvollziehbar und beliebig oft wiederholbar. Nicht erforderlich ist es, Expertenwissen von erfahrenen Konstrukteuren oder Berechnungs-Ingenieuren bei jeder Anwendung erneut zu erfragen. Subjektive Faktoren sowie Fehler und Irrtümer, die bei der manuellen Vorgabe häufig auftreten, werden ausgeschlossen. Weiterhin ist es nicht erforderlich, eine Vorgabe vorzugeben, welche Flächen als benachbart oder überlappend gelten sollen.

Das erfindungsgemäße Verfahren ist auch dann anwendbar, wenn das System viele Körper mit verbindbaren Flächen oder Flächen mit komplizierten Geometrien umfaßt. Für ein derartiges System ist es oft unmöglich, in vertretbarer Zeit von Hand Zwischenräume zwischen verbindbaren Flächen zu ermitteln.

Der Vorteil der automatischen Erkennung fällt dann noch stärker ins Gewicht, wenn die Vorhersage des mechanischen Verhaltens mehrmals durchgeführt werden muß. Dies ist z. B. dann

erforderlich, wenn verschiedene Konstruktionen eines technischen Systems verglichen werden sollen oder wenn verschiedene Konstruktionsstände durchlaufen werden und dabei die Positionen und/oder Orientierungen von Flächen verändert werden. Für jede Finite-Elemente-Simulation einer Konstruktion oder eines Konstruktionsstandes ist erneut die Erzeugung Finiter Elemente erforderlich.

Möglich ist, daß durch das erfindungsgemäße Verfahren solche Paare verbindbarer Flächen automatisch ermittelt werden, die von Bearbeitern nicht als Anwendungsfälle der vorgegebenen Fügetechnologie entdeckt wurden. Dies ist dann der Fall, wenn Finite Elemente in den Flächen das Entscheidungs-Kriterium erfüllen und als verbindbar ermittelt werden. Falls beispielsweise die Fügetechnologie, die für das erfindungsgemäße Verfahren vorgegeben ist, preisgünstiger ist als andere Fügetechnologien, so zeigt das erfindungsgemäße Verfahren Einsparungsmöglichkeiten auf. Beispielsweise wird als Fügetechnologie das Kleben vorgegeben, und ermöglicht wird, einzelne Körper in Kunststoff anstelle in Stahl auszuführen. Erst durch das Kleben lassen sich Körper aus Kunststoff miteinander verbinden.

Das erfindungsgemäße Verfahren läßt sich auch dann anwenden, wenn Flächen der Konstruktion unabhängig voneinander vernetzt worden sind und daher inkompatible Vernetzungen aufweisen. Weil die Vernetzungen unabhängig durchgeführt wurden und inkompatibel sein können, lassen sich die Körper des Systems parallel konstruieren, z. B. von unterschiedlichen Bearbeitern, die sich nicht über die Vernetzung abstimmen müssen. Weil paralleles Konstruieren und paralleles Vernetzen ermöglicht wird und keine Abstimmung über die Vernetzungen erforderlich ist, wird Zeit eingespart und ein simultaner Produktentwurf ermöglicht. Möglich ist, die Flächen unabhängig voneinander zu vernetzen und zunächst Finite-Elemente-Simulationen für jeden Körper unabhängig von anderen Körpern durchzuführen. Die einmal erzeugten Vernetzungen der einzel-

nen Flächen lassen sich für verschiedene Finite-Elemente-Simulation des gesamten Systems wiederverwenden.

Das mechanische Verhalten einer Schicht läßt sich nur dann realitätsnah vorherzusagen, wenn die Schicht als räumliches, also dreidimensionales Objekt, und nicht als Fläche in der Simulation auftritt. Daher werden weitere Finite Elemente für die Schicht erzeugt. Gemäß Anspruch 12 werden die Zwischenräume zwischen den erfindungsgemäß ermittelten Paaren von Finiten Elemente automatisch vernetzt. Dadurch werden Finite Elemente mit Knotenpunkten für diese Zwischenräume erzeugt. Diese Vernetzung hängt nicht notwendigerweise ab von der Vernetzung der approximierenden Flächen. Daher läßt die Vernetzung der Schichten sich gut an die jeweilige Aufgabenstellung, die mit Hilfe der Lösung des erfindungsgemäß erzeugten Gleichungssystems behandelt werden soll, anpassen. Beispielsweise wird je nach Aufgabenstellung die verbindende Schicht in viele kleine oder wenige große weitere Finite Elemente zerlegt. Die Dicke der verbindenden Schicht wird berücksichtigt - auch dann, wenn die Schicht an verschiedenen Stellen unterschiedliche Dicken aufweist. Die Schicht wird im Gleichungssystem kontinuums-mechanisch behandelt. Beispielsweise ist ein Körper ein ebenes Blech und ein anderer Körper ein V-förmig gefaltetes Blech. Gemäß des erfindungsgemäßen Verfahrens werden ausschließlich Finite Elemente in dem einen verbindbaren Schenkel des V-förmigen Blechs und Finite Elemente im benachbarten Teil des anderen Blechs als verbindbare Finite Elemente ermittelt. Weitere Finite Elemente werden nur in dem Zwischenraum zwischen dem verbindbaren Schenkel und den gegenüberliegenden Bereich des ebenen Blechs erzeugt.

Weiterhin lassen sich mechanische Kenngrößen der Schicht in Gleichungen des Gleichungssystems berücksichtigen. Ist die Schicht z. B. eine Klebnaht, können mechanische Kenngrößen des verwendeten Klebstoffs berücksichtigt werden. Das mechanische Verhalten der verbindenden Schicht bei Verschiebungen der jeweiligen Flächen parallel zur Schicht läßt sich vorher-sagen.

Anspruch 2 legt Ausgestaltungen fest, wie die Auswahl von Elemente-Paaren aufgrund ihres Abstandes schnell durchgeführt wird. Die schnell ausführbare Auswahl wird gemäß Anspruch 2 mit Hilfe der Knotenpunkte der beiden Flächen eines Flächen-Paars getroffen. Zunächst werden alle Knoten-Paare ermittelt, die aus je einem Knotenpunkt der einen Fläche und einem Knotenpunkt der anderen Fläche bestehen. Falls die eine Fläche N_1 Knotenpunkte und die andere Fläche N_2 Knotenpunkte umfaßt, werden hierbei $N_1 * N_2$ Knoten-Paare ermittelt. Für jedes Knoten-Paar wird der Abstand zwischen den beiden Knotenpunkten des Knoten-Paars ermittelt. Unter den $N_1 * N_2$ Paaren von Knotenpunkt wird eine Auswahl getroffen. Diejenigen Knoten-Paare werden ausgewählt, deren beiden Knotenpunkte einen Abstand haben, der kleiner oder gleich einer vorgegebenen oberen Schranke ist.

Möglich ist es, alle Elemente-Paare zu ermitteln, die aus jeweils einem Finiten Element der einen und einem Finiten Element der anderen Fläche des Flächen-Paars bestehen. Hierbei werden oft sehr viele Elemente-Paare ermittelt. Anspruch 2 sieht statt dessen eine Vorauswahl vor: Jedes Elemente-Paar wird ermittelt und damit ausgewählt, dessen eines Finite Element den einen Knotenpunkt eines ausgewählten Knoten-Paars als einen Knotenpunkt und dessen anderes Finite Element den anderen Knotenpunkt des Paars als einen Knotenpunkt besitzt. Nur für diese dergestalt ermittelten und damit ausgewählten Elemente-Paare werden weitere Berechnungen durchgeführt. Diejenigen Elemente-Paare, die nicht gemäß der gerade beschriebenen Vorgehensweise ausgewählt wurden, werden als nicht verbindbar eingestuft. Diese weiteren Berechnungen erfordern in der Regel zeitaufwendigere Berechnungen. Weil Abstände von Knotenpunkten schnell zu berechnen sind, läßt sich die Vorauswahl aufgrund von Abständen von Knotenpunkten hingegen schnell durchführen. Beispielsweise wird der Abstand nur zwischen ausgewählten Elemente-Paaren bestimmt, und unter den ermittelten Elemente-Paaren werden die Elemente-Paare mit einem nicht zu großen Abstand ausgewählt.

Anspruch 3 und Anspruch 4 bilden die Ausgestaltung nach Anspruch 2 weiter. Unter den ermittelten Elemente-Paaren wird eine zusätzliche Vorauswahl aufgrund der Abstände von Knotenpunkten durchgeführt.

Gemäß Anspruch 3 wird für jedes ermittelte Elemente-Paar geprüft, ob jeder Knotenpunkt des einen Finiten Elements des Elemente-Paars von mindestens einem Knotenpunkt des anderen Finiten Elements einen Abstand hat, der kleiner oder gleich einer vorgegebene oberen Schranke ist. Falls ein Knotenpunkt des einen Finiten Elements von allen Knotenpunkten des anderen Finiten Elements einen zu großen Abstand hat, wird die Prüfung abgebrochen und das Elemente-Paar nicht vorausgewählt und damit nicht ausgewählt und weiteren Prüfungen unterzogen. Diejenigen zuvor ermittelten Elemente-Paare werden vorausgewählt, für welche die Prüfung ein positives Ergebnis liefert.

Gemäß Anspruch 4 wird hingegen für jedes ermittelte Elemente-Paar geprüft, ob jeder Knotenpunkt des einen Finiten Elements des Elemente-Paars von allen Knotenpunkten des anderen Finiten Elements einen Abstand hat, der kleiner oder gleich einer vorgegebene oberen Schranke ist. Falls ein Knotenpunkt des einen Finiten Elements von einem Knotenpunkt des anderen Finiten Elements einen zu großen Abstand hat, wird die Prüfung abgebrochen und das Elemente-Paar nicht vorausgewählt und damit nicht ausgewählt und weiteren Prüfungen unterzogen. Diejenigen zuvor ermittelten Elemente-Paare werden vorausgewählt, für welche die Prüfung ein positives Ergebnis liefert.

Anspruch 5 sieht vor, daß der Abstand zwischen zwei Finiten Elementen eines Elemente-Paars nicht nur mit der oberen, sondern auch mit einer vorgegebenen unteren Schranke verglichen wird. Wenn der Abstand kleiner als die untere Schranke ist, wird das Elemente-Paar nicht ausgewählt. Damit wird bereits aufgrund des Abstandes eine Auswahl unter den Elemente-Paaren durchgeführt. Dann, wenn der Abstand größer einer oberen oder kleiner einer unteren Schranke ist, wird entschieden, daß die Finiten Elemente nicht verbindbar sind.

Anspruch 6 legt Ausgestaltungen fest, wie die Auswahl von Elemente-Paaren aufgrund ihres Abstandes schnell durchgeführt wird. Hierbei werden durch verschiedene Abläufe Näherungen für den Abstand ermittelt und mit oberen und/oder unteren Schranken verglichen. Vorzugsweise wird bei der Abstands-Bestimmung mindestens einer dieser Abläufe ausgeführt. Möglich ist auch, mehrere Abläufe durchzuführen und den jeweils bestimmten Abstand mit jeweils einer oberen und/oder unteren Schranke zu vergleichen. Falls alle Abläufe und Vergleiche zu einem positiven Ergebnis führen, werden weitere Prüfungen durchgeführt, um zu entscheiden, daß die beiden Finiten Elemente verbindbar sind. Falls ein Vergleich am Ende eines Ablaufs zu einem negativen Ergebnis führt, wird entscheiden, daß die beiden Finiten Elemente nicht verbindbar sind.

Die Ausgestaltung nach Anspruch 7 legt eine Reihe von weiteren Prüfungen, die in das rechnerauswertbare Entscheidungskriterium einfließen. Beim Fällen der Entscheidung darüber, ob die Finiten Elemente eines ausgewählten Elemente-Paars verbindbar sind oder nicht, wird mindestens einer dieser Prüfungen durchgeführt. Vorzugsweise wendet das Entscheidungskriterium eine logische Kombination der Ergebnisse dieser Prüfungen an. Beispielsweise werden Finite Elemente eines Paars dann als verbindbar eingestuft, wenn alle Prüfungen oder wenn mindestens eine einzige Prüfung erfüllt werden. Vorzugsweise werden die Einzel-Prüfungen in einer vorgegebenen Reihenfolge durchgeführt, so daß die Einzel-Prüfungen mit dem geringsten Rechenaufwand zuerst durchgeführt werden. Für ein Elemente-Paar wird die Durchführung der Einzel-Prüfungen abgebrochen, wenn aufgrund der bereits durchgeführten Einzel-Prüfungen bereits feststeht, ob die Finiten Elemente des Paars verbindbar sind oder nicht.

Gemäß Anspruch 7 wird mindestens eine der folgenden Einzel-Prüfungen durchgeführt:

- Gehören die Finiten Elemente zu Flächen verschiedener Körper? Möglich ist nämlich, daß die beiden Finiten Elemente

eines Elemente-Paars zu zwei verschiedenen Flächen desselben Körpers gehören und verbindbar sind.

- Der Winkel zwischen den beiden Finiten Elementen des Elemente-Paars wird ermittelt, z. B. als Winkel zwischen zwei Normalen auf den Finiten Elementen. Geprüft wird, ob der Winkel kleiner oder gleich einer oberen Schranke ist - dann liefert die Prüfung ein positives Ergebnis - oder nicht.
- Das eine Finite Element des Elemente-Paars wird entlang eines Projektionsvektors projiziert. Dieser Projektionsvektor wird beispielsweise dadurch erzeugt, daß zwei Normalen gleicher Länge auf den beiden Finiten Elementen erzeugt werden und der Projektionsvektor der Summenvektor aus diesen beiden ist (Anspruch 8). Geprüft wird, ob das projizierte Finite Element mit dem anderen Finiten Element überlappt - dann liefert die Prüfung ein positives Ergebnis - oder nicht.
- Die Mittelpunkte der beiden Finiten Elemente des Elemente-Paars werden ermittelt. Das eine Finite Element des Elemente-Paars wird entlang eines Projektionsvektors projiziert. Der Abstand zwischen dem Mittelpunkt des projizierten Finiten Elements und dem Mittelpunkt des anderen Finiten Elements wird ermittelt. Geprüft wird, ob der Abstand kleiner oder gleich einer oberen Schranke ist - dann liefert die Prüfung ein positives Ergebnis - oder nicht.
- Wie gerade beschrieben wird der Abstand zwischen dem Mittelpunkt des projizierten Finiten Elements und dem Mittelpunkt des anderen Finiten Elements ermittelt. Die Länge der längsten Kante der beiden Finiten Elemente des Paares wird ermittelt. Der Quotient aus Abstand und längster Kantenlänge wird berechnet. Geprüft wird, ob der Quotient kleiner oder gleich einer oberen Schranke ist - dann liefert die Prüfung ein positives Ergebnis - oder nicht.

Gemäß Anspruch 9 hängt mindestens eine Schranke von mindestens einem der folgenden Parameter ab:

- einem technologischen Parameter der vorgegebenen Füge-technologie,
- der Beschaffenheit einer Oberfläche eines Körpers,
- dem für die Herstellung eines Körpers vorgesehenen Werkstoff,
- einer für alle Körper des Systems gültigen Vorgabe.

Im Falle einer Klebeverbindung sind die maximal und die minimal erreichbare Dicke der Klebschicht und das zum Kleben verwendete Material zwei derartige technologische Parameter. Die für alle Körper gültige Vorgabe resultiert z. B. aus ästhetischen Vorgaben oder aus Unternehmens-Standards.

Der Begriff Füge-technologie umfaßt gemäß Anspruch 10 viele mögliche Technologien, z. B. Kleben, Schweißen oder auch das einer abdichtenden oder isolierenden oder abstandhaltenden Schicht. Beispielsweise wird eine abstandhaltende Schicht aus Kautschuk eingefügt, um einen vorgegebenen Mindest-Abstand zwischen verschiedenen Teilen der Karosserie, z. B. Beplanungen und Innenteile eines Kraftfahrzeugs, einzuhalten.

Die Ausgestaltung nach Anspruch 11 berücksichtigt die Möglichkeit, daß verschiedene Füge-technologien für die Verbindung von Begrenzungsflächen in Frage kommen. Diese verschiedenen Füge-technologien besitzen jeweils eine Bewertung, die z. B. von den Kosten und/oder der Zuverlässigkeit der jeweiligen Technologie abhängt. Für jedes Paar von Begrenzungsflächen werden die zur Verbindung dieses Paares anwendbaren Füge-technologien ermittelt. Möglich ist, daß gar keine oder nur eine Füge-technologie ermittelt wird. Falls hingegen mehrere ermittelt werden, wird mit Hilfe der Bewertungen eine ausgewählt. Möglich ist, daß dadurch unterschiedliche Füge-technologien für ein System ausgewählt werden.

Das mechanische Verhalten der Schicht läßt sich dann noch realitätsnäher vorherzusagen, wenn die Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen einer Schicht in einem der Zwischenräume und den durch die Schicht verbundenen Flächen berücksich-

tigt werden. Zwischen Knotenpunkten von weiteren Finiten Elementen der Schicht und angrenzenden Punkten einer Begrenzungsfläche eines mit der Schicht verbundenen Körpers bestehen mechanische Abhängigkeiten, z. B. das Prinzip der virtuellen Arbeit, demzufolge die Kräfte und Momente zwischen den Knotenpunkten und den angrenzenden Punkten im Gleichgewicht sind. Diese Abhängigkeiten werden durch Gleichungen zwischen den Knotenpunkten in der Schicht und angrenzenden Punkten berücksichtigt.

Anspruch 16 sieht eine vorteilhafte Ausgestaltung vor, wie diese Abhängigkeiten berücksichtigt werden. Anspruch 17 zeigt eine weitere Ausgestaltung auf, die Knotenpunkte einspart und die damit die Anzahl von Unbekannten im zu lösenden Gleichungssystem reduziert.

Im folgenden wird ein Ausführungsbeispiel der Erfindung anhand der beiliegenden Zeichnungen näher beschrieben. Dabei zeigen:

Fig. 1. einen Körper und zwei approximierende Mittelflächen des zu untersuchenden Systems;

Fig. 2. Flächenelemente für die Körper und Mittelflächen der Fig. 1;

Fig. 3. die Bestimmung des minimalen und maximalen Abstandes zwischen zwei Flächenelementen (erste und zweite Prüfung);

Fig. 4. die Festlegung einer oberen Schranke für den Abstand zweier Knotenpunkte;

Fig. 5. die Bestimmung des Abstandes zwischen Mittelpunkt und Schnittpunkt einer Normalen (erste Prüfung);

Fig. 6. die Bestimmung des Abstandes zwischen Knotenpunkt und Schnittpunkt einer Normalen (zweite Prüfung);

Fig. 7. die Bestimmung des maximalen Winkels zwischen zwei Flächenelementen (dritte Prüfung);

Fig. 8. die Bestimmung des maximalen Winkels zwischen zwei Flächenelementen in einer anderen Ausführungsform (Abwandlung der dritten Prüfung);

Fig. 9. die Bestimmung des Abstandes zwischen Mittelpunkt und Schnittpunkt einer Normalen (vierte Prüfung);

Fig. 10. die Bestimmung des Abstandes zwischen Mittelpunkt und Schnittpunkt einer Normalen sowie Vergleich mit einer Kantenlänge (Abwandlung der vierten Prüfung);

Fig. 11. die fünfte Prüfung;

Fig. 12. verbindbare Bereiche der Flächen F.1 und F.2;

Fig. 13. einen Zwischenraum, der durch eine Klebeschicht verbindbar ist;

Fig. 14. ein Beispiel für zwei verbindbare Flächen desselben Körpers;

Die im folgenden beschriebene Ausführungsform bezieht sich auf eine Karosserie eines Kraftfahrzeugs als das System. Die Karosserie umfaßt verschiedene Bleche sowie andere Körper, und automatisch ermittelt wird, welche dieser Bleche sich in welchen Bereichen durch Klebeverbindungen miteinander verbinden lassen.

Eine rechnerverfügbare Konstruktion der Karosserie wurde mit Hilfe eines Werkzeugs zum rechnerunterstützten Konstruieren (computer-aided design, CAD) erzeugt und ist in Form eines CAD-Modells verfügbar. Beispielsweise wurde das CAD-Werkzeug CATIA verwendet. Eine Beschreibung von CATIA ist z. B. unter <http://www.catia.com>, abgefragt am 5. 2. 2003, verfügbar. Die gesamte Karosserie einschließlich der Bleche werden volumenhaft konstruiert, so daß die Dicken der Bleche festgelegt sind.

Weil die Bleche sehr dünn im Vergleich zu ihrer Ausdehnung sind, werden sie in den Finite-Elemente-Simulationen durch ihre Mittelflächen approximiert. Alle Mittelflächen werden in zweidimensionale Finite Elemente in Form von Schalenelementen zerlegt.

Ein Präprozessor wird verwendet, um aus dem CAD-Modell für die Karosserie die Daten zu erzeugen, die für eine Finite-Elemente-Simulation benötigt werden. Die Vernetzung des CAD-Modells der Karosserie wird mit Hilfe dieses Präprozessors automatisch durchgeführt. Das erfindungsgemäße und im folgenden beschriebene Verfahren wird während der Vernetzung durchgeführt, nämlich nachdem die Finite Elemente für die approximierenden Bleche erzeugt worden sind.

Ein Beispiel für einen solchen Präprozessor ist das Software-Werkzeug MEDINA. Eine Beschreibung von MEDINA ist unter http://www.c3pdm.com/des/products/medina/documentation/medina-DINA4_e.pdf, abgefragt am 5. 2. 2003, verfügbar. Das Modul „MEDINA / PreProcessing“ importiert automatisch ein CAD-Modell, das im Datenformat von CATIA oder auch in den standardisierten Datenformaten STEP oder VDA abgespeichert ist.

MEDINA führt nach dem Import die Vernetzung des CAD-Modells der Karosserie automatisch aufgrund von Vorgaben eines Benutzers durch. In MEDINA werden hierbei die Finiten Elemente und die Knotenpunkte erzeugt und diese in rechnerverfügbarer Form im Datenformat von MEDINA abgespeichert.

Ein Werkzeug zur Durchführung einer Simulation gemäß der Finite-Elemente-Methode (FEM-Werkzeug) importiert diese Beschreibung im Datenformat von MEDINA oder einem anderen Datenformat und führt die Finite-Elemente-Simulationen durch. Der Fachmann kennt verschiedene FEM-Werkzeuge, z. B.

- MSC.NASTRAN und MSC.PATRAN, beide beschrieben unter <http://www.mscsoftware.com/products/>, abgefragt am 5. 2. 2003,
- ABAQUS, beschrieben unter http://www.hks.com/products/products_overview.html, abgefragt am 5. 2. 2003,
- PAMCRASH für Finite-Elemente-Simulationen von Kollisionen, beschrieben unter <http://www.esi-group.com/products/crash/index.php>, abgefragt am 5. 2. 2003.

In diesem Beispiel umfaßt die Konstruktion des Systems zwei Bleche und einen volumenhaften Körper K.1. Die Bleche sind in diesem Beispiel beide 2 mm dick und werden in der jeweiligen Mitte durch zwei Flächen F.1 bzw. F.2 approximiert. Der Körper K.1 wird durch zwei begrenzenden Flächen F.6 und F.7 repräsentiert. Fig. 1 zeigt den Körper K.1 und vier Flächen F.1, F.2 der beiden Bleche und F.6, F.7 des Körpers K.1. Die Flächen F.1, F.6 und F.2 sind gefaltet und umfassen zwei Ebenen. Die Abstände sowie die unterschiedlichen Orientierungen der Flächen und des Körpers im Raum sind zur Verdeutlichung stark übertrieben dargestellt. Die Fläche F.6 des Körpers K₁ zeigt zur Fläche F.1 und ist in Fig. 1 verdeckt.

Ermittelt werden alle Paare von Flächen, die zu zwei verschiedenen Körpern gehören. Insgesamt gibt es 4 Flächen und demnach $4 * 3 / 2 = 6$ Paare, die aus jeweils zwei Flächen be-

stehen. Weil die Konstruktion einen Körper mit zwei Flächen umfaßt, besteht eines dieser sechs Flächen-Paare aus zwei Flächen desselben Körpers, nämlich dem Paar (F.6, F.7). Das Flächen-Paar (F.6, F.7) wird in dieser Ausführungsform nicht auf Verbindbarkeit untersucht. Untersucht werden die übrigen fünf Flächen-Paare.

Eine Vernetzung aller Flächen wird erzeugt. Die Finiten Elemente haben in diesem Beispiel alle die Gestalt von drei- oder viereckigen Flächenelementen. In diesem Beispiel liegen alle vier Knotenpunkte eines viereckigen Flächenelements in einer Ebene. Viereckige Flächenelemente, für die dies nicht zutrifft, werden für die Prüfung auf Verbindbarkeit vorzugsweise in zwei dreieckige Flächenelemente zerlegt. Eine Alternative hierzu sieht vor, ein viereckiges Flächenelement, dessen Knotenpunkte nicht in einer Ebene liegen, für die Prüfungen auf Verbindbarkeit durch ein approximierendes viereckiges Flächenelement zu ersetzen, dessen vier Knotenpunkte alle in einer Ebene liegen.

Fig. 2 zeigt einige Flächenelemente für die Körper und für die Mittelflächen der Fig. 1. Vorzugsweise haben die viereckigen Flächenelemente die Form von Rechteckigen, aber auch andere Formen sind möglich. In diesem Beispiel betragen die Kantenlängen der Flächenelemente 10 mm und 5 mm.

Das erfindungsgemäße Verfahren wird am Beispiel der beiden Mittelflächen F.1 und F.6 erläutert, die zwei verschiedene Bleche approximieren. Automatisch wird das Paar von Flächen F.1, F.6 daraufhin untersucht, welche Paare von Flächenelementen der Flächen F.1, F.6 sich durch je eine Klebeverbindung miteinander verbinden lassen. Hierfür wird für jedes Elemente-Paar entschieden, ob die beiden Flächenelementen des Elemente-Paars durch eine Klebeverbindung verbindbar sind oder nicht.

Fig. 3 illustriert beispielhaft die Auswahl von Elemente-Paaren für das Flächen-Paar, das aus den beiden Flächen F.1 und F.6 besteht. Als erstes werden die Knotenpunkte aller

Flächenelemente ermittelt, und ihre Koordinaten werden in je einem Vektor abgespeichert. Bei fünf Flächen-Paaren werden dadurch fünf Vektoren mit je drei Koordinaten von Knotenpunkten abgespeichert. Zu den Knotenpunkten der Fläche F.1 gehören die Knotenpunkte 200.1, 200.2, 200.3, 200.4, 200.5 und 200.6. Zu den Knotenpunkten der Fläche F.6 gehören die Knotenpunkte 201.1, 201.2, 201.3, 201.4, 201.5 und 201.6.

Vorgegeben ist in diesem Beispiel, daß eine Klebeverbindung maximal 1 mm dick sein darf. Hieraus wird eine obere Schranke für den maximalen Abstand zwischen den Knotenpunkten zweier verbindbarer Flächenelemente abgeleitet. Diese Ableitung illustriert Fig. 4.

Vereinfachend wird im Beispiel der Fig. 4 angenommen, daß die beiden Flächenelemente 100.2 und 101.2 zueinander parallel sind. Die Länge der Strecke vom Knotenpunkt 201.1 der Fläche F.6 zum nächstgelegenen Punkt 230.23 der Fläche F.1 darf maximal 1 mm betragen. Der nächstgelegene Punkt 230.23 ist der Fußpunkt einer Normale auf F.6 durch den Knotenpunkt 201.1. Die Kantenlängen beider Flächenelemente betragen 5 mm und 10 mm. Der Abstand 260.1 des Knotenpunktes 201.1 zum nächstgelegenen Knotenpunkt 200.7 ist demnach kleiner oder gleich

$$\sqrt{a^2+b^2+c^2} = \sqrt{1^2+(10/2)^2+(5/2)^2} = 5,67 \text{ mm}$$

Um auf der sicheren Seite zu liegen, wird als obere Schranke Δ_1 für den Abstand zweier Knotenpunkte $\Delta_1 = 6 \text{ mm}$ festgelegt.

Die Flächenelemente der Fläche F.1 haben insgesamt N_1 Knotenpunkte, die der Fläche F.6 insgesamt N_2 Knotenpunkte. Jeder Abstand zwischen einem Knotenpunkt von F.1 und einem Knotenpunkt von F.6 wird ermittelt. Hierfür sind $N_1 * N_2$ Abstandsberechnungen erforderlich. Die Berechnung des Abstandes zwischen zwei Punkten erfordert wesentlich weniger Rechenzeit als andere Prüfungen von Finiten Elementen, daher werden Abstandsberechnungen zuerst durchgeführt, und in Abhängigkeit vom Ergebnis dieser Abstandsberechnungen werden Elemente-Paare ausgewählt und weitere, rechenaufwendigere Prüfungen

nur für die ausgewählten Elemente-Paare durchgeführt. Die berechneten Abstände werden in einer $N_1 * N_2$ - Matrix zwischengespeichert, weil jeder Abstandswert mehrmals verwendet wird. In einer alternativen Ausführungsform wird in jedem der $N_1 * N_2$ Felder einer $N_1 * N_2$ - Matrix A eine 1 oder eine 0 abgespeichert. $A(i,j)$ ist gleich 1, wenn der Abstand zwischen den Knotenpunkt Nr. i der einen Fläche und dem Knotenpunkt Nr. j der anderen Fläche kleiner oder gleich 6 mm ist, ansonsten gleich 0.

Im Beispiel der Fig. 3 haben u. a. folgende Paare von Knotenpunkten einen Abstand von höchstens $\Delta_1 = 6$ mm zueinander: 200.1 und 201.1, 200.1 und 201.2, 200.1 und 201.3, 200.1 und 201.4, 200.1 und 201.5, 200.1 und 201.6. Einen größeren Abstand haben z. B. 200.6 und 201.2, 200.5 und 201.3.

Ermittelt wird jedes Elemente-Paar, dessen eines Finite Element den einen Knotenpunkt eines ausgewählten Knoten-Paars als einen Knotenpunkt und dessen anderes Finite Element den anderen Knotenpunkt desselben Knoten-Paars als einen Knotenpunkt besitzt. Ein ausgewähltes Knoten-Paar in Fig. 3 ist das Paar 200.1 und 201.1. Daher werden folgende 4*4 Elemente-Paare ermittelt, deren eines Finite Element den Punkt 200.1 und deren anderes Finite Element den Punkt 201.1 als Knotenpunkte besitzen: 100.1 und 101.1, 100.1 und 101.2, 100.1 und 101.3, 100.1 und 101.4, 100.2 und 101.1, ... , 100.4 und 101.1, 100.4 und 101.2, 100.4 und 101.3, 100.4 und 101.4.

Unter diesen ermittelten Elemente-Paaren wird eine Vorauswahl aufgrund der Abstände von Knotenpunkten getroffen. Hierfür wird eine der beiden folgenden Ausführungsformen angewendet:

In der einen Ausführungsform wird für jedes ermittelte Elemente-Paar geprüft, ob jeder Knotenpunkt des einen Finite Elements des Elemente-Paars von mindestens einem Knotenpunkt des anderen Finite Elements einen Abstand hat, der kleiner oder gleich einer oberen Schranke Δ_2 ist, oder nicht. Die Schranke Δ_2 wird so festgelegt, daß im Beispiel der Fig. 4 das Elemente-Paar (100.2, 101.2) vorausgewählt werden, aber

das Elemente-Paar (100.1, 101.2) nicht. Alle drei Finiten Elemente haben Kantenlängen von 10 mm und 5 mm. Wie oben dargelegt, hat daher jeder Knotenpunkt von 101.2 zu mindestens einem Knotenpunkt von 100.2 einen Abstand, der kleiner als 5,67 mm ist. Daher wird als obere Schranke $\Delta_2 = 6$ mm festgelegt.

Das Flächenelement 100.1 hat die Knotenpunkte 200.1, 200.2, 200.3 und 200.4. Das Flächenelement 101.2 hat die Knotenpunkte 201.1, 201.2, 201.3 und 201.4. Durch Lesezugriff auf die $N_1 * N_2$ - Matrix wird festgestellt, daß der Knotenpunkt 200.1 von 100.1 zum Knotenpunkt 201.2 von 101.2 einen Abstand von weniger als $\Delta_2 = 6$ mm besitzt. Weiterhin wird festgestellt, daß auch die Abstände zwischen 200.2 und 201.2, zwischen 200.4 und 201.4 sowie zwischen 200.3 zu 201.3 weniger als $\Delta_2 = 6$ mm betragen. Daher wird das Elemente-Paar (100.1, 101.2) vorausgewählt. Hingegen sind die Abstände zwischen dem Knotenpunkt 201.3 von 101.2 und den Knotenpunkten 200.1, 200.4, 200.5 und 200.6 von 100.4 alle größer als $\Delta_2 = 6$ mm, weswegen das Elemente-Paar (100.4, 101.2) nicht vorausgewählt wird.

In der anderen Ausführungsform wird für jedes ermittelte Elemente-Paar geprüft, ob jeder Knotenpunkt des einen Finiten Elements des Elemente-Paars von jedem Knotenpunkt des anderen Finiten Elements einen Abstand hat, der kleiner oder gleich einer oberen Schranke Δ_2 ist, oder nicht. Die Schranke Δ_2 wird so festgelegt, daß im Beispiel der Fig. 4 das Elemente-Paar (100.2, 101.2) vorausgewählt werden, aber das Elemente-Paar (100.1, 101.2) nicht. Alle drei Finiten Elemente haben Kantenlängen von 10 mm und 5 mm. Der Abstand zwischen einem Knotenpunkt von 100.2 und 101.2 beträgt höchstens

$$\sqrt{a^2+b^2+c^2} = \sqrt{1^2+10^2+5^2} = 11,22 \text{ mm.}$$

Hingegen beträgt der Abstand zwischen 201.1 und 200.3 mehr als 12 mm. In dieser Ausführungsform wird daher $\Delta_2 = 12$ mm festgelegt.

In dieser Ausführungsform wird die Vorauswahl wie folgt vorgenommen: Das Flächenelement 100.1 hat die Knotenpunkte 200.1, 200.2, 200.3 und 200.4. Das Flächenelement 101.2 hat die Knotenpunkte 201.1, 201.2, 201.3 und 201.4. Durch Lesezugriff auf die $N_1 * N_2$ - Matrix wird festgestellt, daß der Knotenpunkt 200.1 von 100.1 zu 201.1, 201.2, 201.3 und 201.4 einen Abstand von jeweils 10 mm oder weniger hat. Weiterhin wird festgestellt, daß der Abstand zwischen 200.2 und 201.1, zwischen 200.2 und 201.2, zwischen 200.2 und 201.3 sowie zwischen 200.2 und 201.4 jeweils weniger als $\Delta_2 = 12$ mm beträgt, daß der Abstand zwischen 200.3 und 201.1, zwischen 200.3 und 201.2, zwischen 200.3 und 201.3 sowie zwischen 200.3 und 201.4 jeweils weniger als $\Delta_2 = 12$ mm beträgt und daß der Abstand zwischen 200.4 und 201.1, zwischen 200.4 und 201.2, zwischen 200.4 und 201.3 sowie zwischen 200.4 und 201.4 jeweils weniger als $\Delta_2 = 12$ mm beträgt. Daher wird das Elemente-Paar (100.1, 101.2) vorausgewählt. Hingegen hat der Knotenpunkt 201.2 von 101.2 zum Knotenpunkt 200.5 von 100.4 einen Abstand größer als Δ_2 . Daher wird das Elemente-Paar (100.4, 101.2) nicht vorausgewählt.

Dieses Vorgehen wird für alle ermittelten Elemente-Paare durchgeführt. Dadurch werden Elemente-Paare ausgewählt. Die weiteren Prüfungen werden nur für diese ausgewählten Elemente-Paare durchgeführt.

Durch die erste Prüfung, die Fig. 5 illustriert, wird der Abstand zwischen den beiden Flächenelementen 100.1 und 101.2 ermittelt. Für die Prüfung wird eine Normale auf dem Flächenelement 100.1 und eine weitere Normale auf dem Flächenelement 101.2 ermittelt. Eine Gerade 211.4 durch den Mittelpunkt 240.2 von 100.1 wird erzeugt. Der Mittelpunkt 240.2 wird als Schnittpunkt der beiden Diagonalen im Flächenelement 100.1 bestimmt. Die Gerade 211.4 hat dieselbe Richtung wie die Summe aus den beiden Normalen auf 100.1 bzw. 101.2. Der Schnittpunkt 230.1 zwischen der Geraden 211.4 und dem Flächenelement 101.2 wird ermittelt. Gibt es keinen solchen Schnittpunkt, so liefert die Prüfung ein negatives Ergebnis. Ansonsten wird

der Abstand zwischen dem Mittelpunkt 240.2 und dem Schnittpunkt 230.1 mit einer vorgegebenen oberen Schranke $\Delta_5 = 1,8$ mm verglichen. Vorzugsweise wird der Abstand zusätzlich mit einer unteren Schranke $\Delta_6 = 0,8$ mm verglichen. Ist dieser Abstand kleiner oder gleich Δ_5 und größer oder gleich Δ_6 , so liefert die Prüfung ein positives Ergebnis. Ansonsten wird automatisch entschieden, daß 100.1 und 101.2 nicht durch eine Klebeverbindung verbindbar sind.

Eine nicht durch eine Figur illustrierte Abwandlung der ersten Prüfung sieht vor, die beiden Mittelpunkte der beiden Flächenelemente 100.1 und 101.2 zu ermitteln. Der Abstand zwischen den beiden Mittelpunkten wird ermittelt und als Abstand der beiden Flächenelemente verwendet.

Fig. 6 illustriert eine zweite Prüfung für das Elemente-Paar mit den Flächenelementen 100.4 und 101.1. In den vier Knotenpunkten 200.1, 200.4, 200.5 und 200.6 des Flächenelements 100.4 wird je eine Normale auf 100.1 erzeugt. Die vier Schnittpunkte dieser vier Normalen mit der Fläche F.6 werden ermittelt. Ein solcher Schnittpunkt kann auch außerhalb des Flächenelements 101.1 liegen. In Fig. 6 sind die Normale 210.5 durch den Knotenpunkt 200.4 und ihr Schnittpunkt 230.4 mit der Fläche F.6 dargestellt. 230.4 liegt außerhalb des Flächenelements 101.1. Der Abstand zwischen dem Knotenpunkt 200.4 und dem Schnittpunkt 230.4 der durch 200.3 verlaufenden Normalen 210.5 wird ermittelt und mit einer oberen Schranke Δ_7 und einer unteren Schranke Δ_8 verglichen. Weiterhin werden

- der Abstand zwischen 200.1 und dem Schnittpunkt der durch 200.1 verlaufenden Normale mit F.6,
- der Abstand zwischen 200.5 und dem Schnittpunkt der durch 200.5 verlaufenden Normale mit F.6
- und der Abstand zwischen 200.6 und dem Schnittpunkt der durch 200.6 verlaufenden Normale mit F.6

ermittelt und jeweils mit Δ_7 und Δ_8 verglichen. Weiterhin werden vier Normalen auf 101.1 erzeugt, die durch 201.1,

201.4, 201.5 und 201.6 verlaufen. Ihre Schnittpunkte mit F.1 werden ermittelt. In Fig. 6 sind die Normale 210.6 durch den Knotenpunkt 201.1 und ihr Schnittpunkt 230.5 mit der Fläche F.1 gezeigt. Auch die vier Abstände der vier Schnittpunkte der vier Normalen auf F.6 mit den jeweiligen Knotenpunkten durch 201.1, 201.4, 201.5 und 201.6 werden ermittelt und jeweils mit Δ_7 und Δ_8 verglichen.

Fig. 7 illustriert die als nächstes durchgeführte dritte Prüfung, durch die der Winkel 220.1 zwischen den beiden Flächenelementen 100.1 und 101.2 ermittelt wird. Eine Normale 210.1 auf das Flächenelement 100.1, die 100.1 in einem Fußpunkt 230.10 schneidet, wird erzeugt. Im Falle ebener Flächenelemente hängt das Ergebnis der Prüfung nicht von der Wahl des Fußpunkts 230.10 ab. Falls ein Flächenelement mit vier Knotenpunkten nicht eben ist, wird es in zwei dreieckige Flächenelemente zerlegt, und das folgende Verfahren wird für jedes dieser beiden Dreiecke ausgeführt. Vorzugsweise hat die Normale die Länge 1. Weiterhin wird eine Normale 210.2 auf das Flächenelement 101.2 erzeugt, die ebenfalls die Länge 1 hat. Diese Normale wird in den Fußpunkt 230.10 verschoben. Die Lage dieser verschobenen Normalen wird durch die gestrichelte Linie 210.3 veranschaulicht. Der Winkel α zwischen 210.1 und 210.2, der gleich dem Winkel 220.1 zwischen 210.1 und 210.3 ist, wird gemäß folgendem Zusammenhang bestimmt:

$$210.1 * 210.2 = ||210.1|| * ||210.2|| * \cos \alpha = \cos \alpha = \cos (220.1)$$

Hierbei bezeichnet $210.1 * 210.2$ das Skalarprodukt der beiden Vektoren 210.1 und 210.2 und $||210.1||$ die Euklidische Länge des Vektors 210.1. Der dergestalt bestimmte Winkel α wird mit einer vorgegebenen oberen Schranke $\Delta_4 = 10$ Grad verglichen. Ist der Winkel 220.1 kleiner oder gleich Δ_4 , so liefert die Prüfung ein positives Ergebnis. Ansonsten wird automatisch entschieden, daß 100.1 und 101.2 nicht durch eine Klebeverbindung verbindbar sind.

In Fig. 8 wird eine Abwandlung der gerade beschriebenen dritten Prüfung illustriert. Der Mittelpunkt 240.2 des Flächenelements 100.1 wird ermittelt. Eine Normale 210.4 auf das Flächenelement 100.1, die 100.1 im Mittelpunkt 240.2 schneidet, wird erzeugt. Ermittelt wird der Schnittpunkt 230.1 der Normalen 210.4 mit dem anderen Flächenelement 101.2. Gibt es keinen solchen Schnittpunkt, so liefert die Prüfung ein negatives Ergebnis, und entschieden wird, daß 100.1 und 101.2 nicht durch eine Klebeverbindung verbindbar sind. Gibt es einen Schnittpunkt 230.1, so wird eine Normale 210.5 durch den Schnittpunkt 230.1 auf dem anderen Flächenelement 101.2 erzeugt. Der Winkel 220.2 zwischen 210.4 und 210.5 wird mit der vorgegebenen oberen Schranke Δ_4 verglichen. Ist der Winkel 220.2 kleiner oder gleich Δ_4 , so liefert die Prüfung ein positives Ergebnis. Ansonsten wird automatisch entschieden, daß 100.1 und 101.2 nicht durch eine Klebeverbindung verbindbar sind.

Die vierte Prüfung wird durch Fig. 9 illustriert. Der Mittelpunkt 240.2 von 100.1 wird ermittelt oder aus einer vorigen Prüfung wiederverwendet. Eine Normale 210.4 auf 100.1 durch den Mittelpunkt 240.2 wird erzeugt. Der Schnittpunkt 230.1 dieser Normalen mit dem Flächenelement 101.2 wird ermittelt. Gibt es keinen solchen Schnittpunkt, so liefert die Prüfung ein negatives Ergebnis. Ansonsten werden der Mittelpunkt 240.1 des Flächenelements 101.2 und der Abstand zwischen 230.1 und 240.1 ermittelt. Dieser Abstand wird mit einer vorgegebenen oberen Schranke $\Delta_9 = 4$ mm verglichen. Ist dieser Abstand kleiner oder gleich Δ_9 , so liefert die Prüfung ein positives Ergebnis. Ansonsten wird automatisch entschieden, daß 100.1 und 101.2 nicht durch eine Klebeverbindung verbindbar sind.

Eine Abwandlung dieser vierten Prüfung wird durch Fig. 10 illustriert. Wie gerade beschrieben, wird der Abstand zwischen dem Schnittpunkt 230.1 und dem Mittelpunkt 240.1 von 101.2 ermittelt. Zusätzlich wird die Länge der längsten Kante der beiden Flächenelemente 100.1 und 101.2 ermittelt. Hierzu wer-

den die Längen von acht Kanten ermittelt, nämlich folgender Kanten:

die Kante von 200.1 nach 200.2,
die Kante von 200.1 nach 200.4,
die Kante von 200.3 nach 200.2,
die Kante von 200.3 nach 200.4,
die Kante von 201.1 nach 201.2,
die Kante von 201.1 nach 201.4,
die Kante von 201.3 nach 201.2,
die Kante von 201.3 nach 201.4.

In diesem Falle sind die Kante von 200.1 nach 200.4 und die Kante von 200.3 nach 200.2 die längsten Kanten von 100.1 und sind gleich lang. Der Quotient aus dem Abstand zwischen dem Schnittpunkt 230.1 und dem Mittelpunkt 240.1 (im Zähler) und der Länge der Kante von 200.1 nach 200.4 (im Nenner) wird berechnet. Der Zähler kann gleich 0 sein, der Nenner nicht. Dieser Abstand wird mit einer vorgegebenen oberen Schranke $\Delta_{10} = 0,9$ mm verglichen. Ist dieser Abstand kleiner oder gleich Δ_{10} , so liefert die Prüfung ein positives Ergebnis. Ansonsten wird automatisch entschieden, daß 100.1 und 101.2 nicht durch eine Klebeverbindung verbindbar sind.

Die fünfte Prüfung wird durch Fig. 11 illustriert. Zwei Normalen 210.1 auf das Flächenelement 100.1 und 210.2 auf das Flächenelement 101.2 werden gebildet. Die beiden Fußpunkte der Normalen sind beliebig wählbar. Zwei Normalenvektoren gleicher Länge auf diesen beiden Normalen werden erzeugt. Diese beiden Normalenvektoren sind in Fig. 11 nicht gezeigt. Der Summenvektor 250.1 dieser beider Normalenvektoren wird erzeugt. Er beginnt im Fußpunkt 230.10 der Normalen 210.1. In diesem Beispiel wird zuerst eine Gerade 210.8 erzeugt, die durch den Knotenpunkt 200.4 des einen Flächenelements 100.1 verläuft und die Richtung des Summenvektors 250.1 hat. Diese Gerade 210.8 schneidet die Fläche F.6 im Punkt 200.13. In

gleicher Weise wird eine Gerade 210.9 in Richtung von 250.1 erzeugt, die durch den Knotenpunkt 200.1 geht. Diese Gerade 210.9 schneidet F.6 in 200.12. Das gleiche wird für die beiden anderen Knotenpunkte von 100.1 durchgeführt. Dadurch wird ein Viereck mit den Ecken 200.12, 200.13, 200.14 und 200.15 erzeugt. Geprüft wird, ob dieses Viereck einen Überlappungsbereich mit dem Flächenelement 101.2 hat oder nicht. Falls ein Überlappungsbereich vorhanden ist, steht fest, daß die fünfte Prüfung ein positives Ergebnis liefert. Im Beispiel der Fig. 11 ist ein Überlappungsbereich vorhanden.

Vorzugsweise werden folgende Prüfungen für ein ermitteltes Elemente-Paar durchgeführt:

- die Abwandlung der ersten Prüfung (Abstand der Mittelpunkte),
- wenn diese ein positives Ergebnis erbrachten, die dritte Prüfung,
- wenn diese ein positives Ergebnis erbrachte, die Abwandlung der vierten Prüfung,
- wenn diese ein positives Ergebnis erbrachte, die fünfte Prüfung,
- wenn auch diese ein positives Ergebnis erbrachte, wird entschieden, daß die beiden Flächenelemente des Elemente-Paars miteinander verbindbar sind.

Im Beispiel von Fig. 3 bis Fig. 11 werden folgende Entscheidungen gefällt:

- 100.1 ist mit 101.2 verbindbar,
- 100.2 ist mit 101.3 verbindbar,
- 100.3 ist mit 101.4 verbindbar,
- 100.4 ist mit 101.1 verbindbar.

Fig. 12 illustriert, welche Bereiche der in Fig. 1 gezeigten Flächen miteinander verbindbar sind. Diese Bereiche werden durch das oben beschriebene Verfahren automatisch ermittelt. Ermittelt wird, welche Flächenelemente von F.1 mit jeweils

einem Flächenelement von F.6 verbindbar sind. Die Menge dieser Flächenelemente von F.1 liefert den mit F.6 verbindbaren Teilbereich von F.1. Die entsprechenden Schritte werden für F.6 durchgeführt. In Fig. 12 werden ein Teilbereich F.1a der Fläche F.1 und zwei Teilbereiche F.6a und F.6b der Fläche F.6 gezeigt. F.1a besitzt die beiden Eckpunkte 201.15 und 201.16 sowie zwei weitere nicht gezeigte Eckpunkte. F.6a besitzt die vier Eckpunkte 201.11, 201.12, 201.13 und 201.14. Das erfindungsgemäße Verfahren liefert u. a. das Ergebnis, daß die beiden Teilbereiche F.1a und F.6a miteinander verbindbar sind. Der Teilbereich F.6b ist nicht mit einem Teilbereich von F.1 verbindbar.

In Fig. 13 sind die beiden Teilbereiche F.1a und F.6a der Flächen F.1 und F.6 gezeigt, die miteinander verbindbar sind. Durch die rechnerverfügbare Konstruktion sind die Dicken aller Bleche des Systems vorgegeben. Deshalb sind auch die beiden Dicken d_1 und d_3 derjenigen beiden Bleche vorgegeben, die durch die Flächen F.1 und F.6 approximiert werden. Zwei Flächen F.1k und F.6k werden erzeugt. F.1k liegt in der Oberfläche desjenigen Blechs, das durch die Fläche F.1 approximiert wird, und damit auch in der Begrenzungsfläche der verbindenden Klebeschicht. F.6k ist deckungsgleich zu F.6a, gehört aber zur Klebeschicht. F.1k und F.6k haben die gleichen Abmessungen und Orientierungen wie F.1a bzw. F.6a. F.1k liegt parallel zu F.1a, F.6k parallel zu F.6a. Der Abstand zwischen F.1a und F.1k beträgt $0,5 \cdot d_1$ (also die halbe Dicke des Blechs. Fig. 13 zeigt die beiden Teilbereiche F.1k und F.6k, außerdem den Zwischenraum ZW zwischen diesen beiden Teilbereichen.

Die beiden Flächen eines Flächen-Paars gehören in dieser Ausführungsform stets zu zwei verschiedenen Körpern des Systems. Möglich ist aber auch, zwei Flächen desselben Körpers auf Verbindbarkeit zu untersuchen. Fig. 14 zeigt ein Beispiel für zwei verbindbare Flächen F.10 und F.11 desselben Körpers. Erfindungsgemäß wird ermittelt, daß eine Klebeverbindung erzeugt werden kann, die den Zwischenraum ausfüllt.

Im nächsten Schritt werden vorzugsweise die Zwischenräume zwischen den verbindbaren Teilbereichen automatisch vernetzt. Hierbei wird die Dicke des Blechs berücksichtigt, und nur Zwischenräume in Schichten zwischen Blechen werden vernetzt. Die Vernetzung eines Zwischenraums, welcher zwei Bleche des Systems verbindet, wird automatisch ausgeführt. Hierbei werden folgende Informationen aus der rechnerverfügbaren Konstruktion des Systems übernommen:

- die räumliche Lage der beiden approximierenden Flächen F.1 und F.6 und
- die Dicken der beiden Bleche - in diesem Beispiel hat jedes Blech eine über die gesamte Ausdehnung gleichbleibende Dicke, die beiden Dicken können sich voneinander unterscheiden.

In diesem Beispiel beträgt die Dicke des Zwischenraums ZW 0,8 mm. Die Dicke und die räumliche Ausdehnung des Zwischenraums werden automatisch aus diesen geometrischen Informationen über die Bleche gewonnen. Möglich ist auch, statt dessen die Dicke des Zwischenraums und die räumliche Lage der beiden approximierenden Flächen vorzugeben.

Möglich ist, die Zwischenräume in Querrichtung in mehrere Volumenelemente zu zerlegen. Falls z. B. ein Zwischenraum 0,8 mm dick ist und vorgegeben ist, daß ein Zwischenraum in Querrichtung in zwei Volumenelemente zerlegt werden soll, so werden Volumenelemente erzeugt, die in Querrichtung des Zwischenraums, also senkrecht zu den Begrenzungsflächen der Schicht, eine Kantenlänge von je 0,4 mm haben. Die Vernetzung der Zwischenräume wird durch wenige und anschauliche Parameter gesteuert. Diese Parameter lassen sich so auswählen, daß die Vernetzung für die jeweilige Aufgabenstellung die besten Ergebnisse liefert. Vorzugsweise sind die Volumenelemente Quader, aber auch Hexader oder andere Formen von Volumenelementen sind möglich.

Für die Vernetzung werden weiterhin folgende vorgegebene Parameter verwendet:

- eine untere und/oder obere Schranke für die Kantenlänge eines Volumenelements in jeder Längsrichtung eines Zwischenraums,
- die Form der Volumenelemente und
- ein Vernetzungsverfahren, z. B. „paving“ oder „free meshing“.

Möglich ist auch, anstelle einer Kantenlänge in Längsrichtung die Anzahl der Volumenelemente, in die der Zwischenraum in Querrichtung zerlegt werden soll, vorzugeben.

Vorzugsweise haben alle Volumenelemente die Form von Quadern oder wenigstens von Hexaedern. In diesem Beispiel beträgt die Anzahl der Volumenelemente in Querrichtung 2. In Querrichtung sollen also jeweils zwei nebeneinanderliegende Volumenelemente erzeugt werden. Standardmäßig haben beide Volumenelemente dieselbe Kantenlänge in Querrichtung, so daß alle Kanten in Querrichtung $0,8 \text{ mm} : 2 = 0,4 \text{ mm}$ lang sind. Weiterhin wird in diesem Beispiel eine Kantenlänge in Längsrichtung von 5 mm in ebenen Bereichen des Zwischenraums und 4 mm in gekrümmten Bereichen vorgegeben.

Alternativ hierzu wird nicht die Kantenlänge in Längsrichtung vorgegeben, sondern eine untere und/oder obere Schranke für das Verhältnis von längster zu kürzester Kante eines Volumenelements. Beispielsweise wird ein Verhältnis von 10 in gekrümmten und 12,5 in ebenen Bereichen eines Zwischenraums vorgegeben. Wie gerade dargelegt, beträgt die kürzeste Kantenlänge 0,4 mm. Daraus wird automatisch als Länge der übrigen Kanten eines Volumenelements $0,4 \text{ mm} * 12,5 = 5 \text{ mm}$ in gekrümmten und $0,4 \text{ mm} * 10 = 4 \text{ mm}$ in ebenen Bereichen der Schicht hergeleitet.

Nachdem die Vernetzung der Konstruktion abgeschlossen ist, werden die physikalischen Zusammenhänge und Randbedingungen ergänzt. Dieser Schritt wird beispielsweise mit „MEDINA/PostProcessing“ vorgenommen.

Ein Beispiel für einen solchen Zusammenhang beschreibt die Spannung in einem Finiten Element abhängig von der Verschiebung seiner Knotenpunkte. Abhängig von der Verschiebung der Knotenpunkte wird ein Dehnungstensor ε des Finiten Elements bestimmt. Vorgegeben ist eine Steifigkeits-Matrix („compliance matrix“) D . Zwischen dem Spannungstensor σ des Finiten Elements und dem Dehnungstensor ε besteht der Zusammenhang $\sigma = D * \varepsilon$.

Möglich ist, daß die Verformungen aus einer Temperaturveränderung ΔT resultieren. Sei α der Ausdehnungs-Koeffizient des für die Fertigung des jeweiligen Körpers verwendeten Werkstoffs. Dann besteht der Zusammenhang $\sigma = D * (\varepsilon - \alpha * \Delta T)$.

Weiterhin wird der Zusammenhang zwischen einwirkender Kraft F und Verformung U bestimmt. Aus Eigenschaften der Werkstoffe, die für die Herstellung des jeweiligen Körpers verwendet werden, z. B. Elastizitäts-Modul und Poisson-Zahl, und aus der Geometrie des Körpers wird eine Steifigkeits-Matrix K des Körpers hergeleitet. Zwischen der Verformung und der einwirkenden Kraft besteht der Zusammenhang $U = K * F$. Möglich ist, daß einige Komponenten von U bekannt sind, z. B. gleich Null sein müssen, und einige Komponenten von F bekannt und andere unbekannt sind.

Nach Ermittlung der verbindbaren Teilbereiche und der Zwischenräume zwischen diesen werden vorzugsweise die Zwischenräume vernetzt. Die Vernetzung wird aber nicht notwendigerweise ausgeführt. Möglich ist z. B. auch, daß statt dessen die Zwischenräume in der Konstruktion hervorgehoben gekennzeichnet werden. Ein Bearbeiter kann entscheiden, ob tatsächlich genau diese Zwischenräume Bestandteil einer Klebeverbindung werden sollen oder mit Dichtungsmaterial ausgefüllt werden sollen, und kann bei Bedarf weitere verbindbare Teilbereiche ergänzen oder als verbindbar erkannte Teilbereiche als nicht verbindbar markieren.

Weiterhin ist möglich, daß automatisch das Gesamt-Volumen der Zwischenräume ermittelt wird und daraus abgeleitet wird, wie

viel Material, z. B. Klebstoff oder Dichtungsmaterial, in diese Zwischenräume insgesamt eingefüllt werden muß. Falls ein Blech durch eine Fläche approximiert wird, so wird die Dicke dieses Blechs berücksichtigt, damit nur das Volumen des Zwischenraums zwischen diesem Blech berücksichtigt wird, nicht aber das Volumen des Blechs selber.

Nachdem die Vernetzung der Begrenzungsfläche F.6 des Körpers K.1, der Mittelfläche F.1 des Blechs und der verbindenden der Klebeverbindung Kl abgeschlossen sind und das Gleichungssystem erzeugt worden ist, wird das Gleichungssystem mit einem kommerziellen Software-Werkzeug für die Finite-Elemente-Methode (FEM-Werkzeug) gelöst.

Der Fachmann kennt verschiedene FEM-Werkzeuge, z. B.

- MSC.NASTRAN und MSC.PATRAN, beide beschrieben unter <http://www.mscsoftware.com/products/>, abgefragt am 5. 2. 2003,
- ABAQUS, beschrieben unter http://www.hks.com/products/products_overview.html, abgefragt am 5. 2. 2003,
- PAMCRASH für Finite-Elemente-Simulationen von Kollisionen, beschrieben unter <http://www.esi-group.com/products/crash/index.php>, abgefragt am 5. 2. 2003.

Die Lösung liefert für jeden Knotenpunkt der Konstruktion den Wert, den die physikalische Größe in diesem Knotenpunkt annimmt. Durch Einsetzen in die Funktion werden die Werte der physikalischen Größe in den ermittelten nächstliegenden Punkten berechnet. Die Lösung wird ausgewertet, um die Konstruktion des Systems zu analysieren.

Patentansprüche

1. Verfahren zum automatischen Erkennen von verbindbaren Flächen in einem technischen System, wobei
 - das System mehrere Körper umfaßt,
 - eine Fügetechnologie vorgegeben ist, durch deren Anwendung eine Schicht zwischen jeweils zwei Körpern des Systems erzeugbar ist,
 - eine rechnerverfügbare Konstruktion des Systems gegeben ist, die für jeden Körper des Systems mindestens eine zum Körper gehörende Fläche (F.1, F.2, F.6, F.7) umfaßt,mit den Schritten
 - Erzeugung von Finiten Elementen (100.1, 100.2, 101.1, 101.2, ...) für die Flächen,
 - für jedes Flächen-Paar, das aus zwei verschiedenen Flächen (F.1, F.6) der Konstruktion besteht, Auswählen aller Elemente-Paare,
 - die aus jeweils einem Finiten Element der einen und einem Finiten Element der anderen Fläche des Flächen-Paars bestehen,
 - deren Abstand voneinander kleiner oder gleich einer vorgegebenen oberen Schranke ist,

- und für jedes ausgewählte Elemente-Paar Entscheiden, ob die beiden Finiten Elemente des Elemente-Paars durch die Füge-technologie verbindbar sind,
- wobei für das Fällen der Entscheidung ein rechnerauswertbares Entscheidungs-Kriterium angewendet wird, das die Abstände, Positionen und/oder Orientierungen der beiden Finiten Elemente mit vorgegebenen Schranken vergleicht.

2. Verfahren nach Anspruch 1,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,

daß beim Auswählen der Elemente-Paare eines Flächen-Paars

- alle Knotenpunkte (200.1, 200.2, ...) der Finiten Elemente (100.1, 100.2, 101.1, 101.2, ...) der beiden Flächen (F.1, F.6) ermittelt werden,
- alle Knoten-Paare, die aus je einem Knotenpunkt der einen Fläche und einem Knotenpunkt der anderen Fläche bestehen, ermittelt werden,
- für jedes Knoten-Paar der Abstand zwischen den beiden Knotenpunkten des Knoten-Paars berechnet wird,
- diejenigen Knoten-Paare ausgewählt werden, deren Knotenpunkte einen Abstand haben, der kleiner oder gleich der Schranke ist, und
- jedes Elemente-Paar ermittelt wird, dessen eines Finite Element den einen Knotenpunkt eines ausgewählten Knoten-Paars als einen Knotenpunkt und dessen anderes Finite Element den anderen Knotenpunkt desselben Knoten-Paars als einen Knotenpunkt besitzt, und
- ermittelte Elemente-Paare als ausgewählte Elemente-Paare verwendet werden.

3. Verfahren nach Anspruch 2,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
daß

- jedes ermittelte Elemente-Paar dann vorausgewählt wird, wenn jeder Knotenpunkt (200.1, 200.2, ...) des einen Finiten Elements (100.1, 100.2, ...) des Elemente-Paars von mindestens einem Knotenpunkt (201.1, 201.2, ...) des anderen Finiten Elements (101.1, 101.2, ...) einen Abstand hat, der kleiner oder gleich einer vorgegebene oberen Schranke ist,
- jedes vorausgewählte Elemente-Paar dann ausgewählt wird, wenn der Abstand zwischen den beiden Finiten Elementen des Elemente-Paars kleiner oder gleich der oberen Schranke ist,
- und für jedes nicht vorausgewählte Elemente-Paar entschieden wird, daß die beiden Finiten Elemente des Elemente-Paars nicht verbindbar sind.

4. Verfahren nach Anspruch 2,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,

- jedes ermittelte Elemente-Paar dann vorausgewählt wird, wenn jeder Knotenpunkt (200.1, 200.2, ...) des einen Finiten Elements (100.1, 100.2, ...) des Elemente-Paars von allen Knotenpunkten (201.1, 201.2, ...) des anderen Finiten Elements (101.1, 101.2, ...) einen Abstand hat, der kleiner oder gleich einer vorgegebene oberen Schranke ist,
- jedes vorausgewählte Elemente-Paar dann ausgewählt wird, wenn der Abstand zwischen den beiden Finiten Elementen des Elemente-Paars kleiner oder gleich der oberen Schranke ist,
- und für jedes nicht vorausgewählte Elemente-Paar entschieden wird, daß die beiden Finiten Elemente des Elemente-Paars nicht verbindbar sind.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
daß beim Auswählen der Elemente-Paare
- dann, wenn der Abstand zwischen den beiden Finiten Elementen eines Elemente-Paars größer einer vorgegebenen Schranke ist,
 - das Elemente-Paar nicht ausgewählt wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
daß beim Vergleich des Abstandes zweier Finiten Elemente eines Elemente-Paars mit einer vorgegebenen oberen und/oder unteren Schranke mindestens einer der folgenden Abläufe durchgeführt wird:
- Bestimmen des Schnittpunktes (240.1) der beiden Diagonalen des einen Finiten Elements (101.2), Bestimmen des Schnittpunktes (240.2) der beiden Diagonalen des anderen Finiten Elements (100.1), Bestimmen des Abstandes zwischen den beiden Schnittpunkten,
 - Erzeugen einer Normalen (210.1. 210.2, ...) auf dem einen Finiten Element des Elemente-Paars, Ermitteln des Fußpunktes (230.23) der Normalen in dem Finiten Element, Ermitteln des Schnittpunktes (230.1, 230.2, ...) der Normalen mit dem anderen Finiten Element, Vergleichen des Abstandes zwischen Fußpunkt und Schnittpunkt mit einer vorgegebenen oberen und/oder unteren Schranke,
 - Erzeugen einer Normalen (210.1) auf dem einen Finiten Element (100.1) und einer Normalen (210.2) auf dem anderen Finiten Element (101.1) des Elemente-Paars, Ermitteln des Summenvektors (250.1) der beiden Normalen, Ermitteln des Schnittpunktes einer Geraden in Richtung

des Summenvektors mit dem anderen Finiten Element, Berechnen des Abstandes zwischen Schnittpunkt der Gerade mit dem einen und Schnittpunkt der Gerade mit dem anderen Finiten Element, Vergleichen des Abstandes mit einer vorgegebenen oberen und/oder unteren Schranke,

- für jeden Knotenpunkt (200.4) des einen Finiten Elements (100.1) des Paares Erzeugen einer Normalen (210.5) durch den Knotenpunkt (200.4) auf dem Finiten Element, Ermitteln des Schnittpunktes (230.4) der Normalen (210.5) mit dem anderen Finiten Element (101.2), Vergleichen des Abstandes zwischen Knotenpunkt (200.4) und Schnittpunkt (230.4) mit einer vorgegebenen oberen und/oder unteren Schranke.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 6,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,

daß beim Fällen der Entscheidung für ein ausgewähltes Elemente-Paar mindestens eine der folgenden Prüfungen durchgeführt wird:

- Prüfen, ob die Finiten Elemente des Elemente-Paares zu Flächen verschiedener Körper gehört,
- Ermitteln des Winkels (220.1, 220.2) zwischen den beiden Finiten Elementen des Elemente-Paares und Vergleichen des Winkels mit einer vorgegebenen oberen Schranke,
- Projizieren des einen Finiten Elements (100.1) des Elemente-Paares entlang eines Projektionsvektors (250.1) und Prüfen, ob das projizierte Finite Element mit dem anderen Finiten Element (101.1, 101.2) überlappt oder nicht,
- Ermitteln der Mittelpunkte (240.1, 240.2, ...) der beiden Finiten Elemente des Elemente-Paares, Projizieren des einen Finiten Elements entlang eines Projektionsvektors (250.1), Ermitteln des Abstands zwischen

dem Mittelpunkt des projizierten Finiten Elements und dem Mittelpunkt des anderen Finiten Elements, Vergleichen des Abstandes mit einer vorgegebenen oberen Schranke,

- Ermitteln der Mittelpunkte (240.1, 240.2, ...) der beiden Finiten Elemente des Elemente-Paars, Projizieren des einen Finiten Elements (100.1) entlang eines Projektionsvektors (250.1), Ermitteln des Abstands zwischen dem Mittelpunkt des projizierten Finiten Elements und dem Mittelpunkt des anderen Finiten Elements (101.2), Ermitteln der Länge der längsten Kante der beiden Finiten Elemente des Paars, Vergleichen des Quotienten aus Abstand und längster Kantenlänge mit einer vorgegebenen oberen Schranke.

8. Verfahren nach Anspruch 7,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
daß

- der Projektionsvektor (250.1) als Summenvektor aus einer Normalen (210.1) auf dem einen Finiten Element (100.1) und einer Normalen (210.2) gleicher Länge auf dem anderen Finiten Element (101.1)
- und der Winkel (220.1, 220.2) zwischen den beiden Finiten Elementen als Winkel zwischen einer Normalen (210.4, 210.3) auf dem einen Finiten Element (100.1) und einer Normalen (210.5, 210.2) auf dem anderen Finiten Element (101.2)

erzeugt wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,

daß die vorgegebenen Schranken von mindestens einem der folgenden Parameter abhängen:

- einem technologischen Parameter der vorgegebenen Füge-
technologie,
- der Beschaffenheit einer Oberfläche eines Körpers,
- einem technologischen Parameter eines für die Herstel-
lung eines Körpers vorgesehenen Werkstoff,
- einer für alle Körper des Systems gültigen Vorgabe.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
daß die vorgegebene Fügetechnologie eine der folgenden
Verfahren umfaßt:

- strukturelles Kleben,
- Montagekleben,
- Falz-Kleben,
- Kleben mit Bördelung,
- Punktschweißen,
- Nahtschweißen,
- Einfügen einer abdichtenden Schicht,
- Einfügen einer isolierenden Schicht,
- Einfügen einer abstandhaltenden Schicht.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
daß verschiedene mögliche Fügetechnologien vorgegeben
sind,

für jede möglich Fügetechnologie

- ein Entscheidungs-Kriterium vorgegeben ist, das die
Positionen und/oder Orientierungen von zwei Finiten E-

lemente mit von der Fügetechnologie abhängigen vorgegebenen Schranken vergleicht,

- und eine Bewertung der Fügetechnologie vorgegeben sind,

für jede Fügetechnologie diejenigen Paare von Finiten Elementen ermittelt werden, die durch die Fügetechnologie verbindbar sind,

wobei bei der Ermittlung das für diese Fügetechnologie vorgegebene Entscheidungs-Kriterium auf die Finiten Elemente des Paares angewendet wird,

eine Bewertung der Fügetechnologie bezüglich des Systems durch Anwendung einer Bewertungsfunktion, die aus der vorgegebenen Bewertung der Fügetechnologie und den mit der Fügetechnologie verbindbaren Elemente-Paaren berechnet, ermittelt wird,

diejenige Fügetechnologie ausgewählt wird, für die bezüglich des Systems die höchste Bewertung ermittelt wurde,

und die weiteren Finite Elemente in den Zwischenräumen erzeugt werden, die durch diejenigen Elemente-Paare, die mit der ausgewählten Fügetechnologie verbindbar sind, begrenzt werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,

daß in den Zwischenräumen (ZW), die durch die als verbindbar erkannten Finiten Elemente begrenzt werden, automatisch weitere Finite Elemente erzeugt werden.

13. Verfahren nach Anspruch 12,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,

daß

- die weiteren Finiten Elemente in den Zwischenräumen (ZW) Volumenelemente sind,
- die Volumenelemente dergestalt erzeugt werden, daß alle Zwischenräume (ZW) vollständig durch Volumenelemente vernetzt werden
- und die Vernetzung unter Verwendung von geometrischen Informationen über die Zwischenräume und Vorgaben für die Vernetzung erzeugt wird.

14. Verfahren nach Anspruch 12,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,

daß mindestens ein weiteres Finite Element in einem Zwischenraum (ZW) ein Flächenelement ist,

das senkrecht auf einer angrenzenden Fläche der Konstruktion steht.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 bis 14,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,

daß

- gemäß der Finite-Elemente-Methode ein Gleichungssystem aufgestellt wird, in dem als Unbekannte die Werte auftreten, die eine räumlich veränderliche physikalische Größe in den Knotenpunkten der erzeugten Finiten Elemente annimmt,
- und die Werte der Größe in den Knotenpunkten durch numerisches Lösen des Gleichungssystems ermittelt werden.

16. Verfahren nach Anspruch 15,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,

daß für eine Menge von Knotenpunkten weiterer Finiten Elemente in den Zwischenräumen (ZW)

- jeweils eine nächstliegende Fläche der Konstruktion, ein nächstliegendes Finites Element dieser Fläche und ein nächstliegender Punkt auf diesem Finiten Element ermittelt werden
- und Gleichungen für physikalische Zusammenhänge zwischen
 - den Werten, welche die physikalische Größe in der Menge von Knotenpunkten annimmt,
 - und den Werten, welche die physikalische Größe in den für die Menge ermittelten nächstliegenden Punkten der Flächen

erzeugt und beim Aufstellen des Gleichungssystems verwendet wird.

17. Verfahren nach Anspruch 15 oder Anspruch 16,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,

daß für mindestens einen Knotenpunkt der Menge

- eine Funktion für einen physikalischen Zusammenhang zwischen dem Wert, den die physikalische Größe im nächstliegenden Punkt annimmt, und den Werten, den diese Größe in den Knotenpunkten des nächstliegenden Finiten Elements annimmt, erzeugt wird
- und beim Aufstellen des Gleichungssystems der Wert der physikalischen Größe im ermittelten Punkt durch Einsetzen der Funktion eliminiert wird.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 17,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,

daß das Gesamt-Volumen in den Zwischenräumen (ZW) zwischen allen verbindbaren Elemente-Paaren ermittelt wird.

19. Computerprogramm-Produkt, das direkt in den internen Speicher eines Computers geladen werden kann und Softwareabschnitte umfaßt, mit denen ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18 ausgeführt werden kann, wenn das Produkt auf einem Computer läuft.
20. Computerprogramm-Produkt, das auf einem von einem Computer lesbaren Medium gespeichert ist und das von einem Computer lesbare Programm-Mittel aufweist, die den Computer veranlassen, ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18 auszuführen.

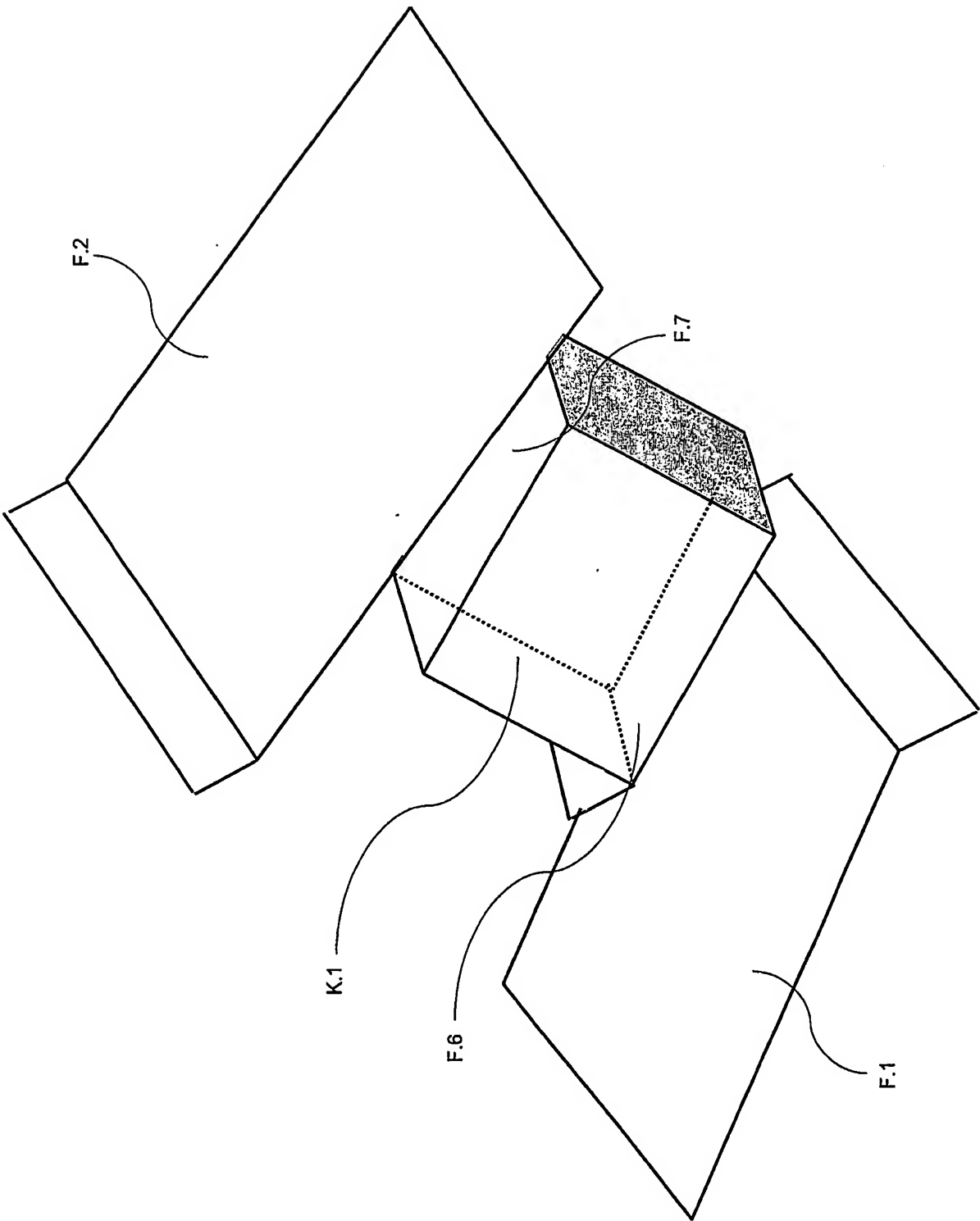


Fig. 1

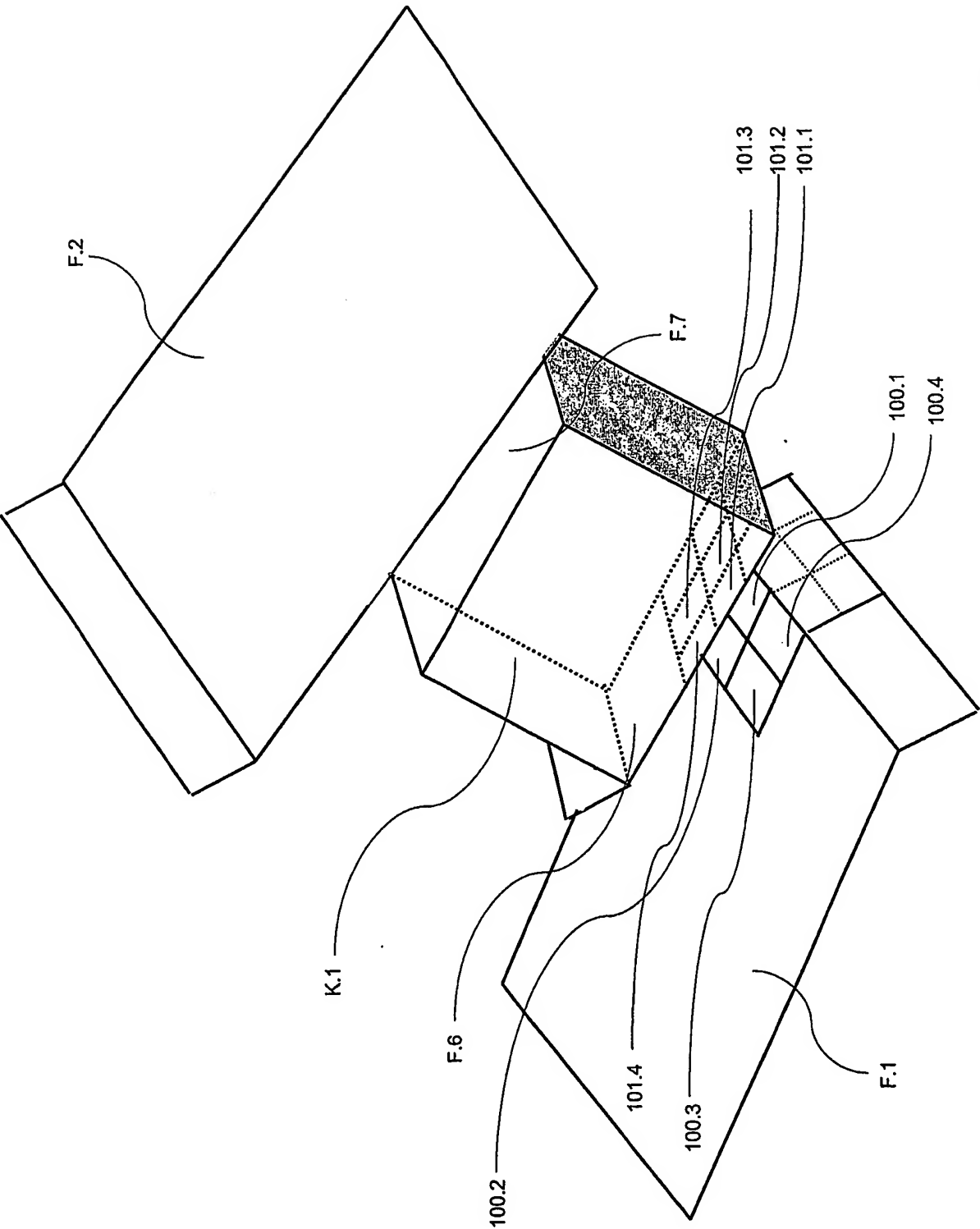


Fig. 2

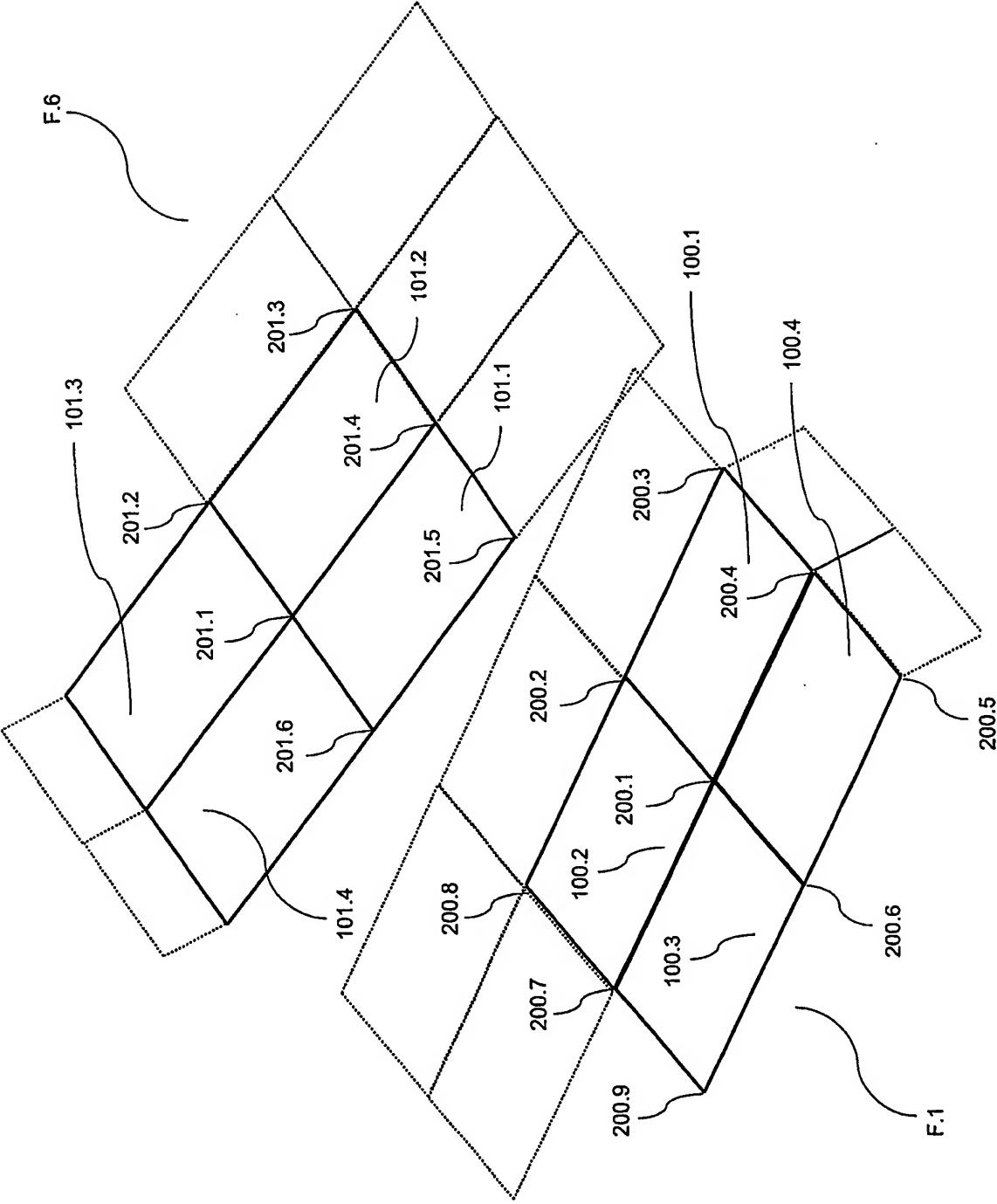


Fig. 3

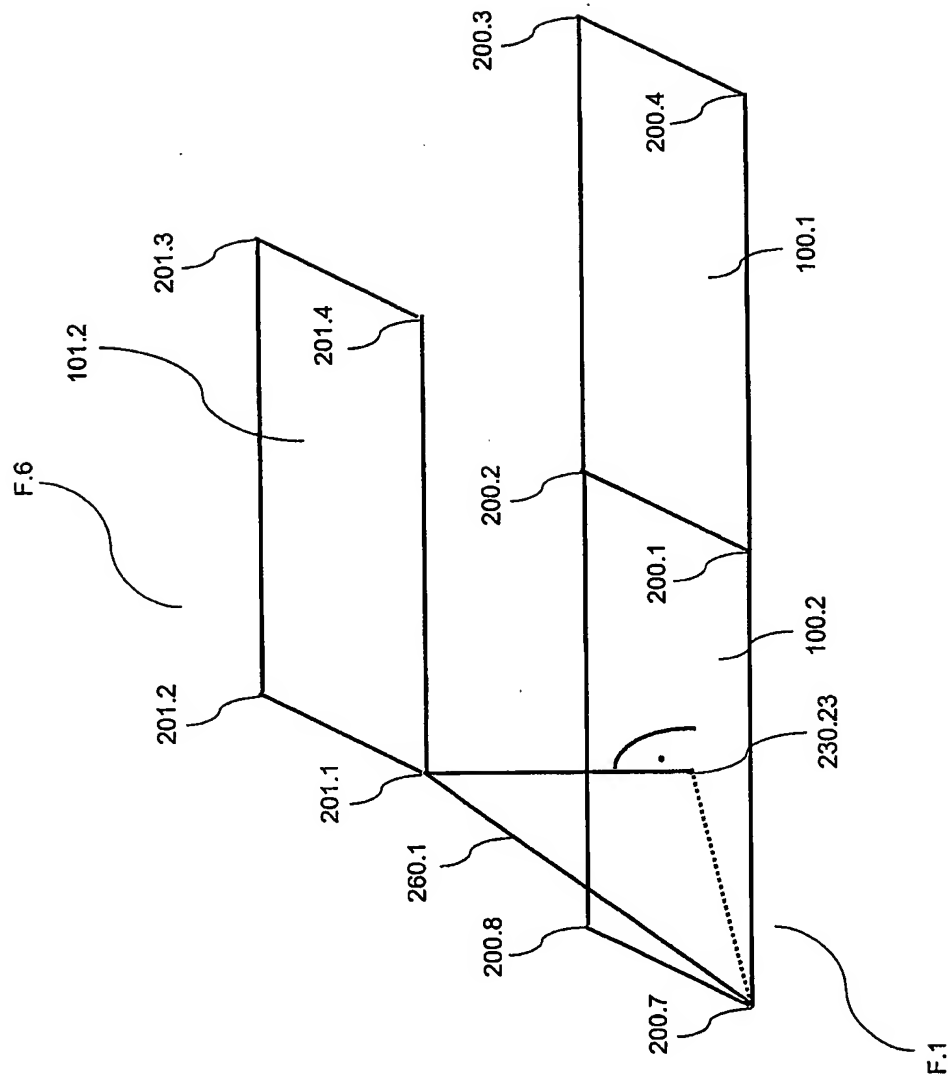


Fig. 4

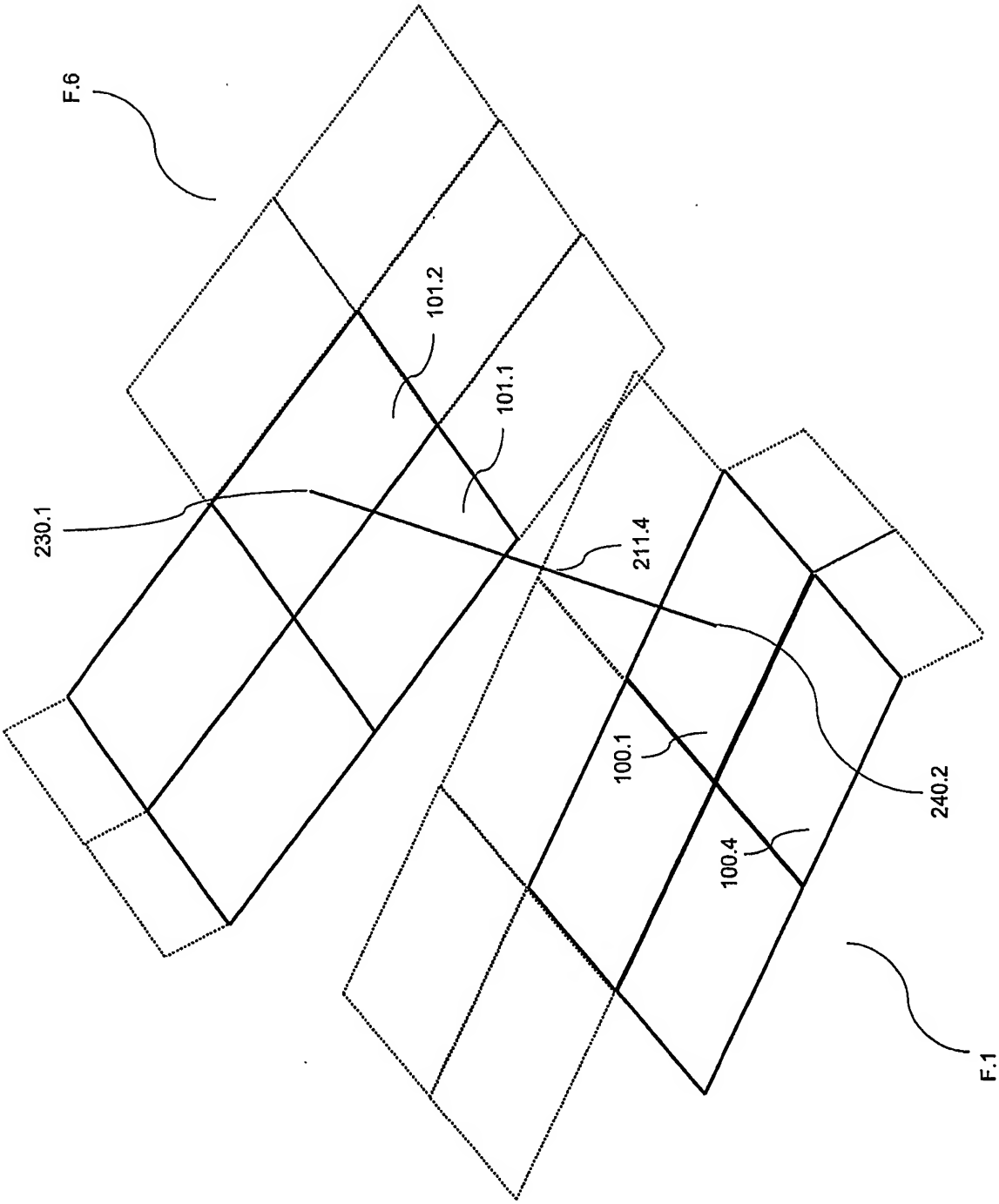


Fig. 5

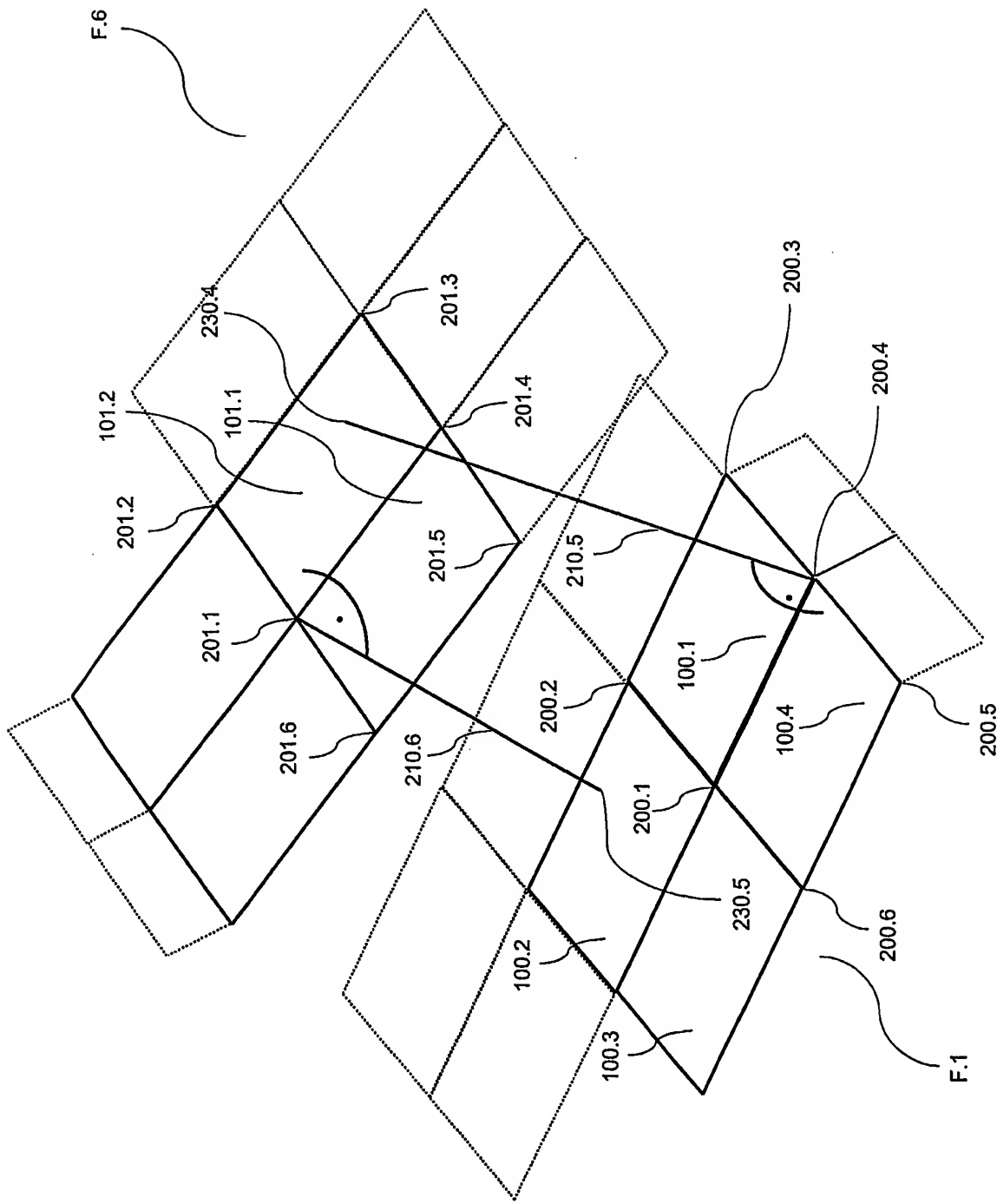


Fig. 6

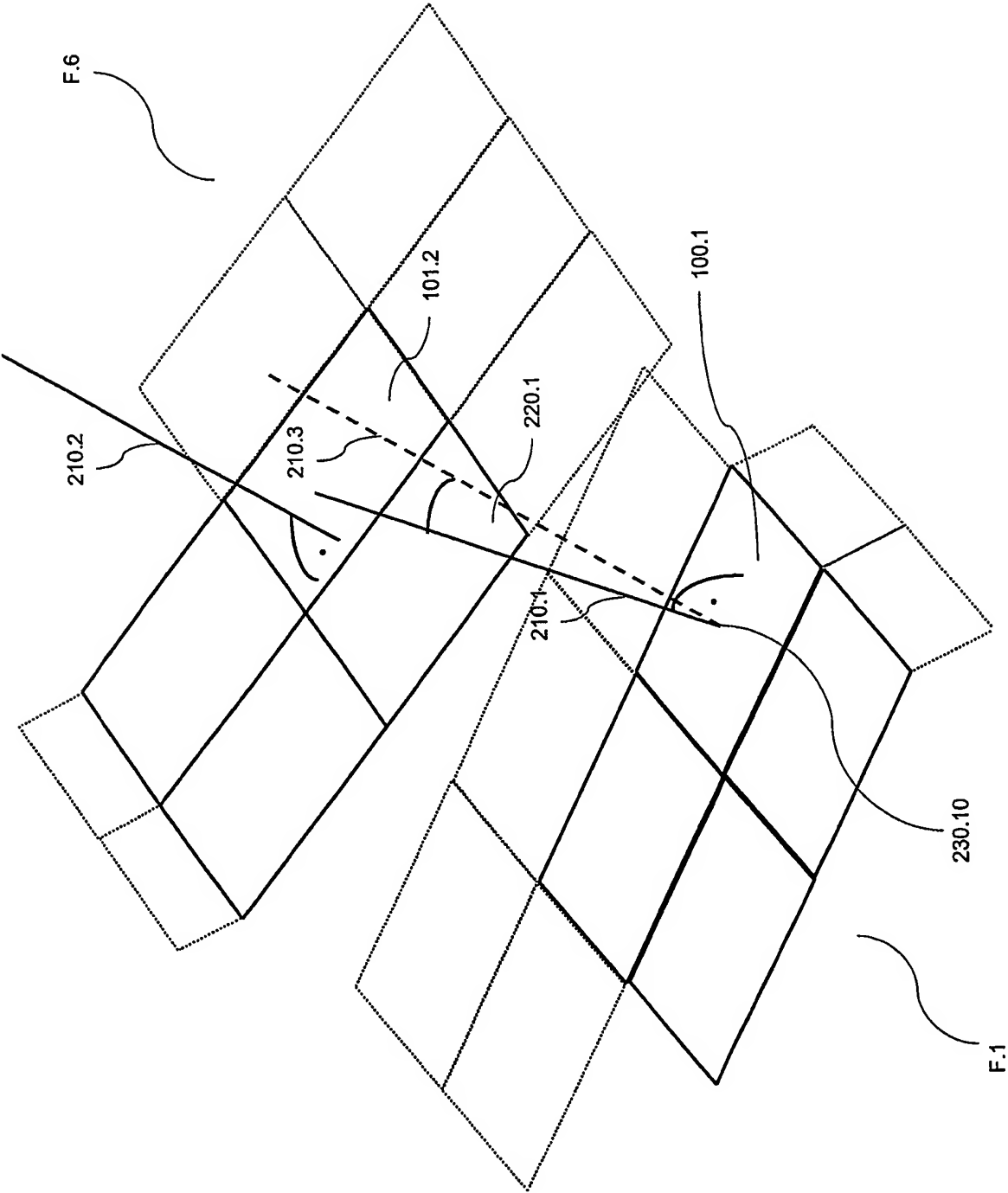


Fig. 7

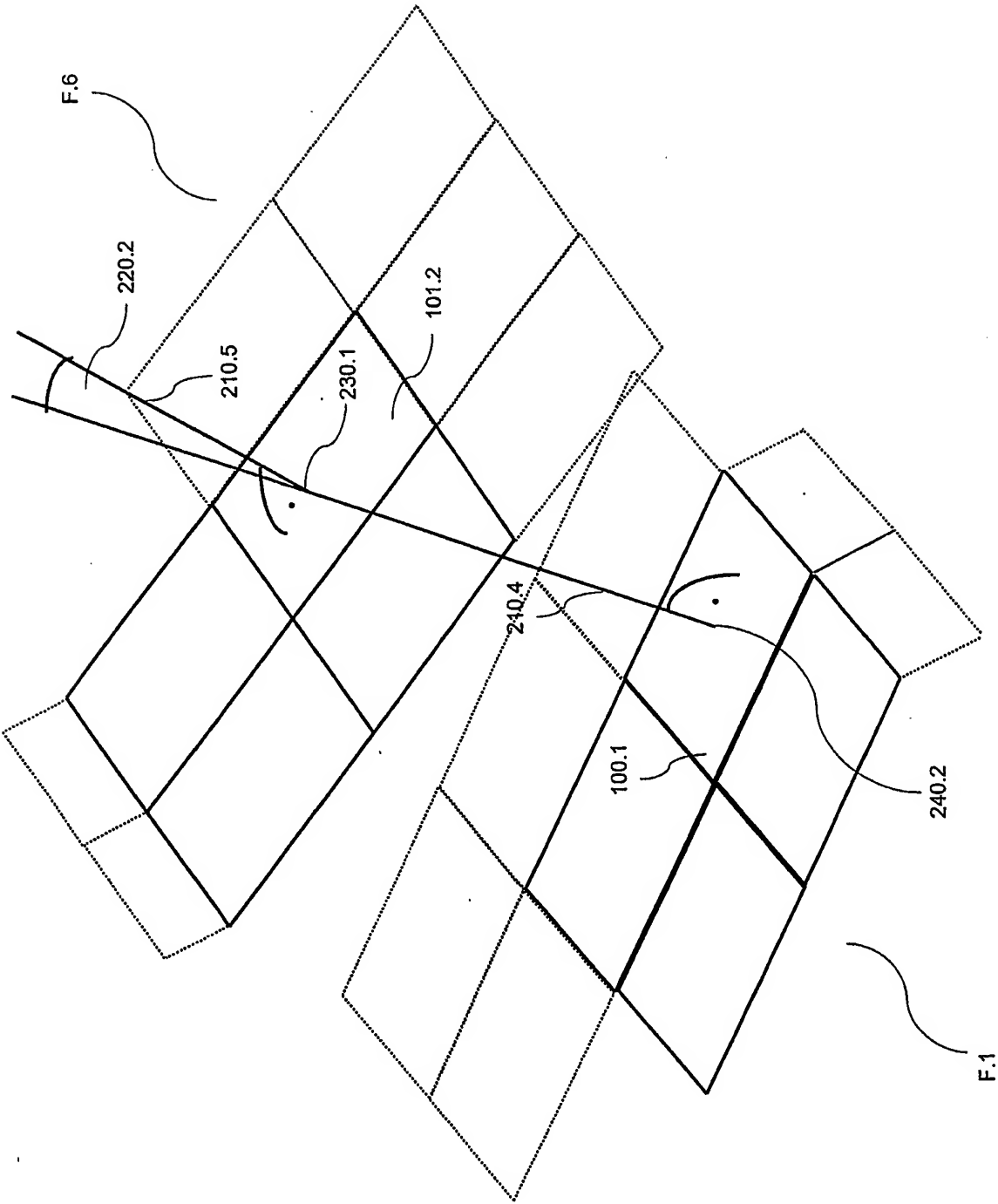


Fig. 8

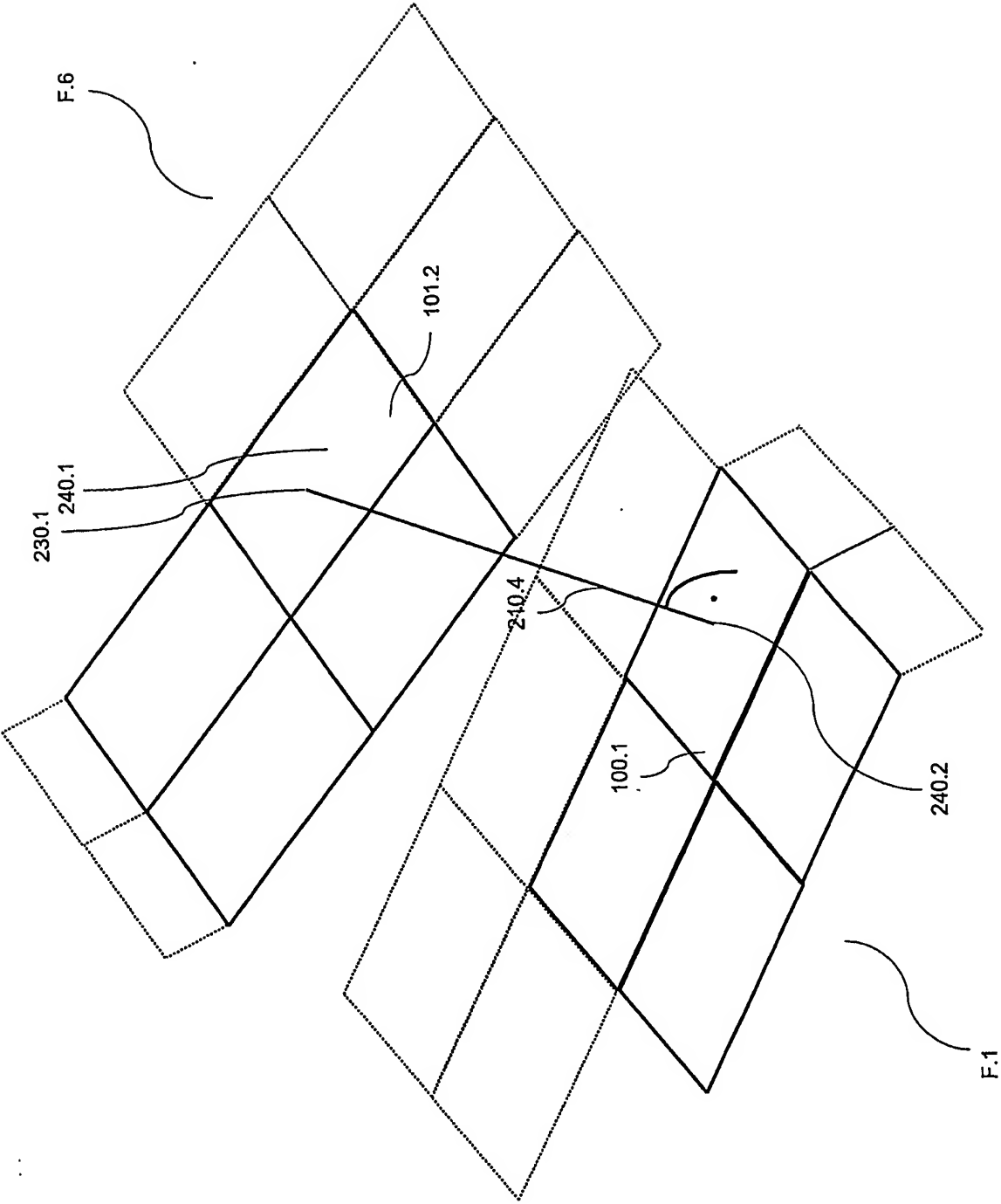


Fig. 9

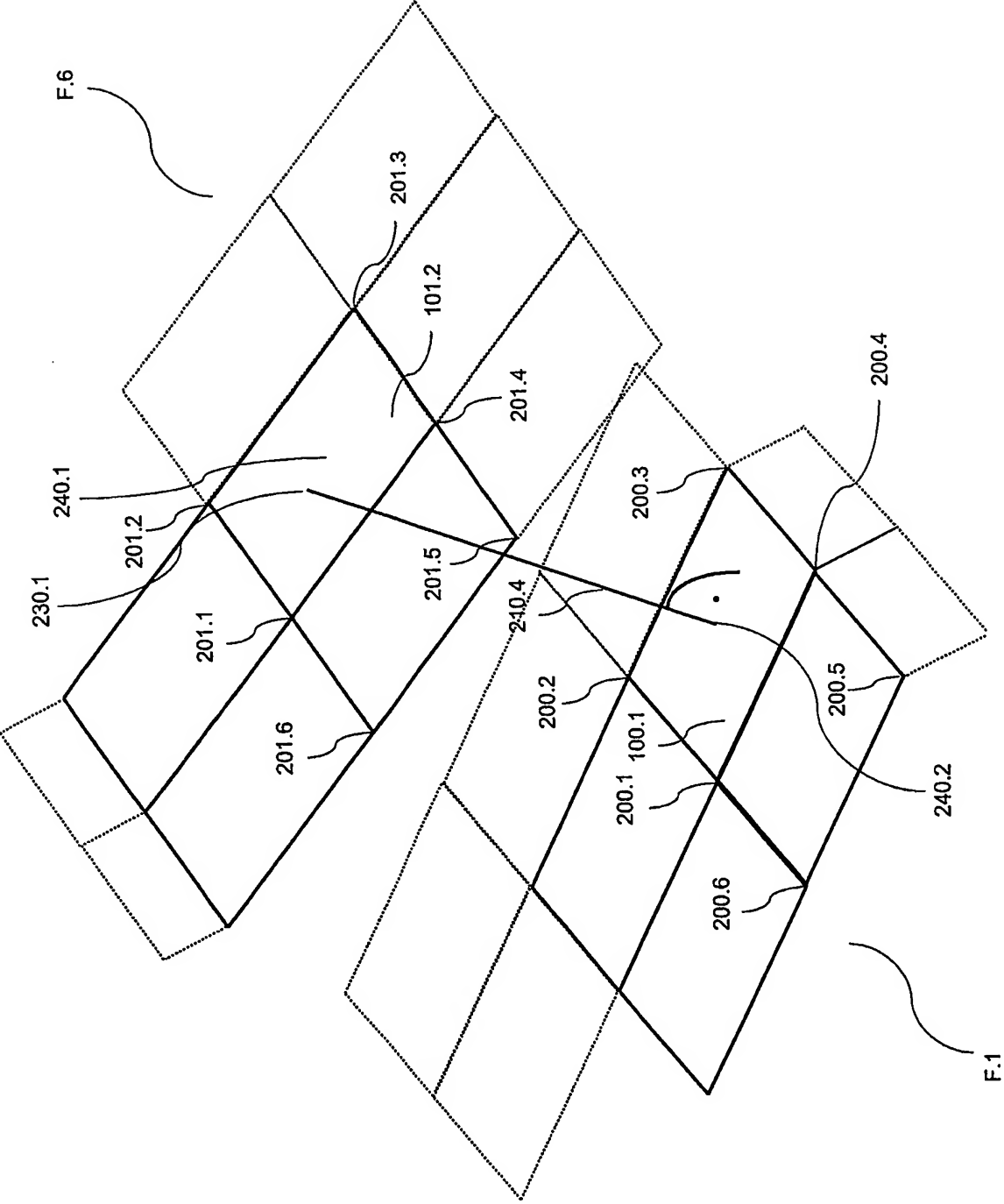


Fig. 10

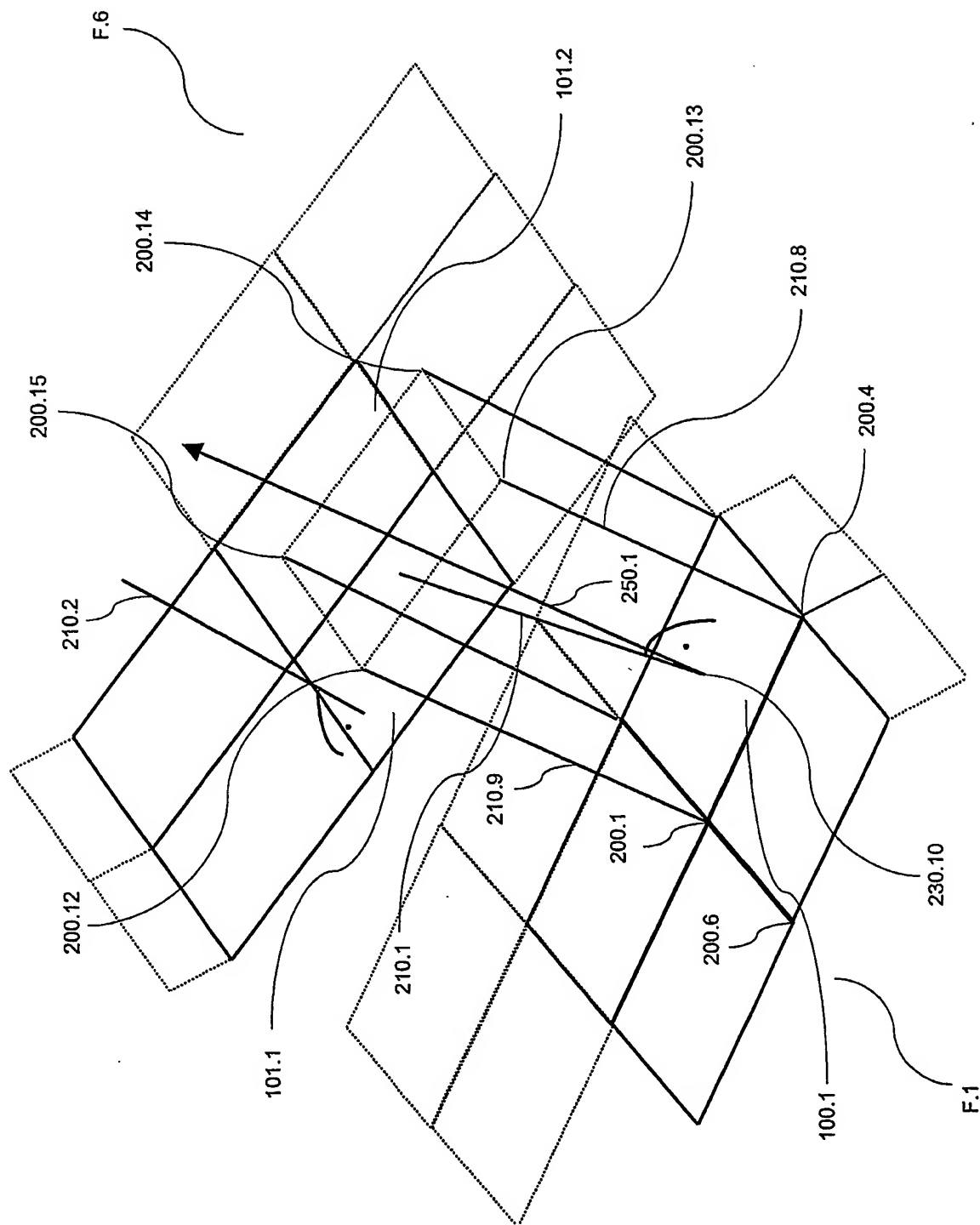


Fig. 11

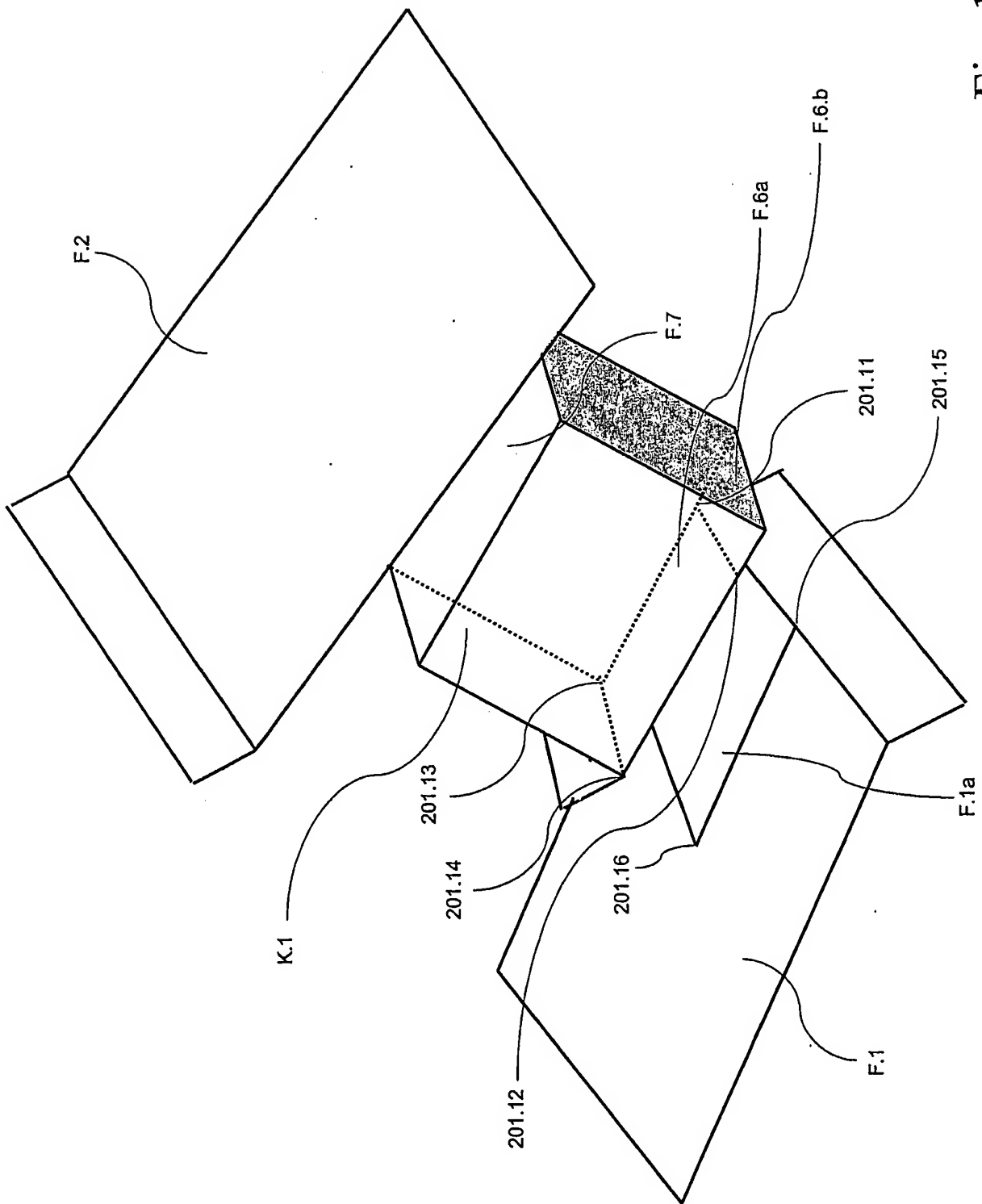


Fig. 12

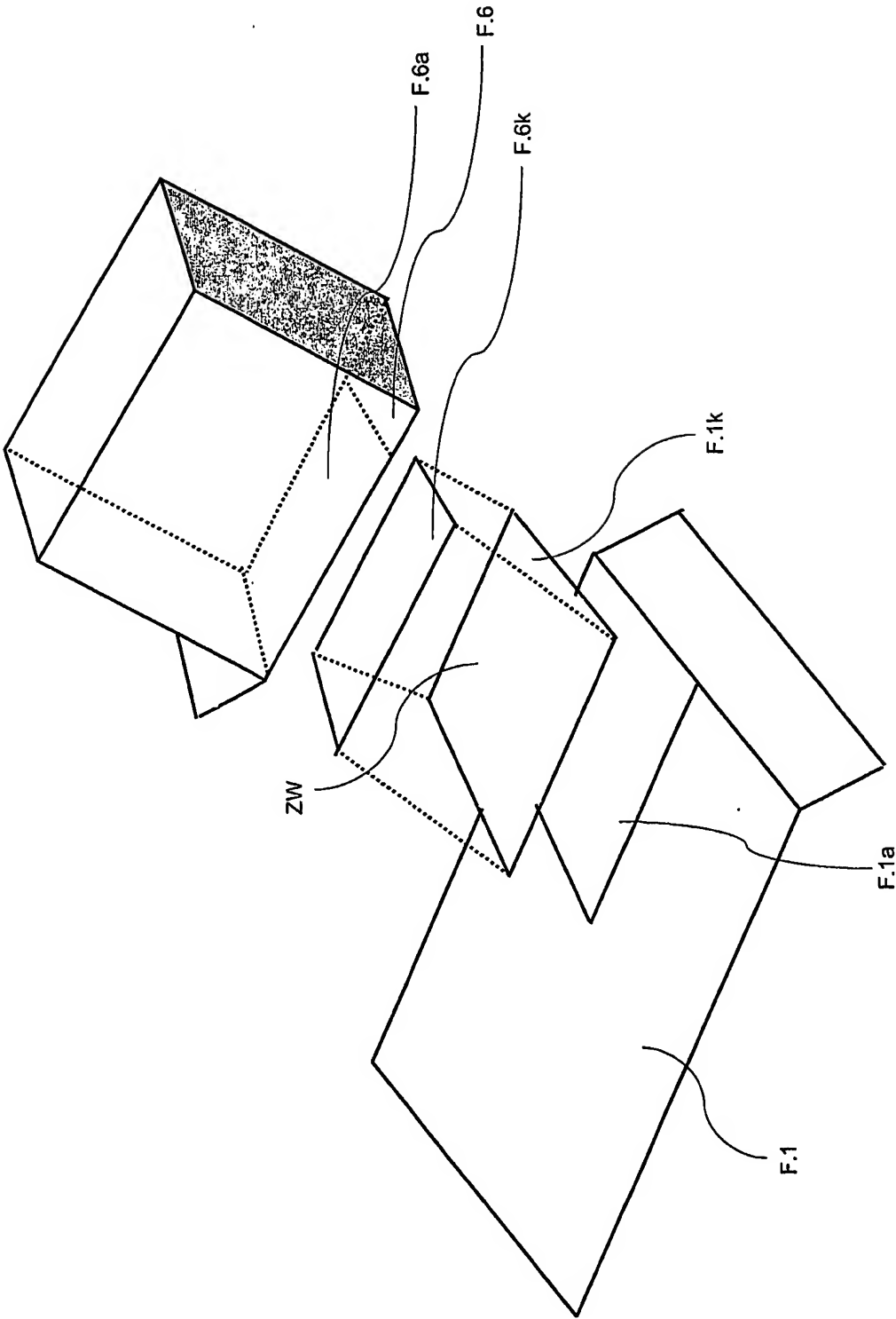


Fig. 13

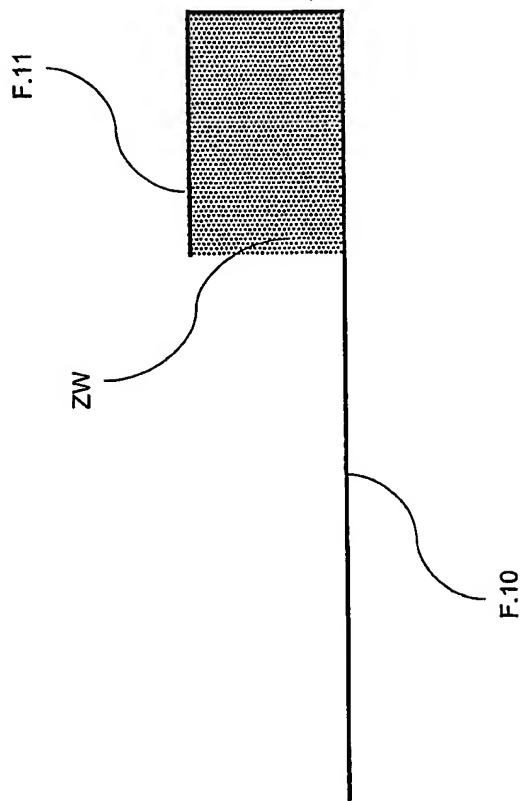


Fig. 14

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☒ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.